



Projecte Fi de Carrera

Enginyeria de Telecomunicació

Desenvolupament d'un node sensor sense fils autoalimentat. Mòdul Piezo-Magnètic

Manfred Höflich Santiesteban

Director: Gonzalo Murillo Rodríguez
Departament d'Enginyeria Electrònica
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE)
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)

Juliol 2012



El sotasignant, Gonzalo Murillo Rodríguez, Professor de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE) de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB),

CERTIFICA:

Que el projecte presentat en aquesta memòria de Projecte Fi de Carrera ha estat realitzat sota la seva direcció per l'alumne *Manfred Höflich Santiesteban*.

I, perquè consti a tots els efectes, signa el present certificat.

Bellaterra, 29/05/2012.

Signatura: *Gonzalo Murillo Rodríguez*

*“Dedicat a qui em va motivar a seguir
endavant i fer realitat les meves il·lusions.*

*Per a tu que m’has ajudat tant
durant aquest temps i m’has donat tot,
per a tu Marina.”*

Índex

Resum	8
Resumen	8
Abstract	8
Capítol 1: Introducció	9
Capítol 2: Objectius	10
BLOC I: Introducció teòrica	11
Capítol 3: Energy harvesting	12
3.1 Què és?	12
3.2 Introducció històrica	12
3.3 Importància de l'energy harvesting	13
3.4 Tipus de font d'energia.....	14
3.4.1 Fonts mediambientals	14
3.4.2 Fonts artificials	14
3.5 Transductors.....	15
3.6 Diagrama de blocs d'un energy harvester.....	16
Capítol 4: Piezoelectricitat	17
4.1 Definició.....	17
4.2 Història	18
4.3 Polarització.....	19
4.4 Equacions característiques.....	21
4.5 Constants i coeficients piezoelèctrics	21
4.6 Dispositius piezoelèctrics en paral·lel i en sèrie.....	23
Capítol 5: Cantilever	24
5.1 Models matemàtics.....	24
5.1.1 Mòdul de Young.....	25
5.1.2 Freqüència de ressonància d'un cantilever	25
5.2 Circuit elèctric equivalent	26
5.3 Teoria d'Euler-Bernoulli i Timoshenko de la biga	26
5.4 Conservació de la energia.....	28
Capítol 6: Magnetisme	31
6.1 Camp magnètic	31
6.2 Magnetització.....	32

6.3 Camp magnètic produït per un material magnetitzat	33
6.4 Susceptibilitat i permeabilitat magnètiques	34
6.5 Susceptibilitat en funció de la temperatura	34
6.6 Energia magnètica	34
6.7 Camp magnètic al voltant d'un conductor	35
6.7.1 Llei de Biot-Savart.....	36
6.7.2 Llei d'Ampère.....	37
6.8 Exemple de càlcul del camp magnètic.....	37
6.9 Equacions de Maxwell.....	37

BLOC II: Simulacions, càlculs i proves pràctiques 39

Capítol 7: Caracterització de l'altaveu	40
7.1 Prova d'acceleració	41
7.2 Anàlisi dels resultats	41
Capítol 8: Càlculs dels elements piezoelèctrics	44
8.1 Càlculs de "Minisense 100 Vibration Sensor" amb massa	44
8.1.1 Massa per 50 Hz	45
8.2 Càlcul de "LDT1-028K Piezo film sensor" amb massa	45
8.3 Càlcul de "LDT1-028K Piezo film sensor" sense massa.....	46
8.3.1 Massa per 50 Hz	46
8.4 Càlcul de V21B.....	46
8.4.1 massa de 2 grams.....	46
8.4.2 massa de 3 grams.....	47
8.4.3 massa per 50 Hz.....	47
8.4.4 comparació entre datasheet i càlculs.....	47
8.5 Càlcul de V25W.....	48
8.5.1 massa de 2 grams.....	48
8.5.2 massa de 6 grams.....	48
8.5.3 massa per 50 Hz.....	48
8.5.4 comparació entre datasheet i càlculs.....	49
Capítol 9: Simulacions dels components piezoelèctrics	50
9.1 Introducció de què és Comsol.....	50
9.2 Element que es simularà	50
9.3 Resultats gràfics del moviment	52

9.3.1 Model 1.....	52
9.3.2 Model 2.....	53
9.4 Resultats numèrics del moviment	54
9.4.1 Model 1.....	54
9.4.2 Model 2.....	54
9.5 Prova amb un material diferent	54
9.6 Conclusions.....	55
Capítol 10: Caracterització dels elements piezoelèctrics	56
10.1 Test de “Minisense 100 Vibration Sensor” amb massa.....	56
10.1.1 Test freqüència ressonància	56
10.1.2 Test escombrat impedàncies	57
10.1.3 Gràfica de potència VS acceleració	58
10.2 Test de “LDT1-028K Piezo film sensor” amb massa	59
10.2.1 Test freqüència ressonància	59
10.2.2 Test escombrat impedàncies	60
10.2.3 Gràfica de potència VS acceleració	61
10.3 Test de “LDT1-028K Piezo film sensor”.....	61
10.3.1 Test freqüència ressonància	61
10.3.2 Test escombrat impedàncies	62
10.3.3 Gràfica de potència VS acceleració	62
Capítol 11: Càlculs camp magnètic	64
Capítol 12: Simulació camp magnètic.....	65
12.1 Simulació amb un fil elèctric.....	65
12.2 Simulació amb dos fils elèctrics	67
12.3 Simulació amb Comsol	69
Capítol 13: Mesures de consum del fil elèctric.....	71
13.1 Consum Braun H-100.....	71
13.2 Consum Marux T-910/3.....	71
13.3 Consums totals	72
Capítol 14: Circuit condicionador EH300	73
14.1 Mode de funcionament	74
Capítol 15: Proves amb el circuit condicionador EH300	76
15.1 Comportament fins a l'instant t_2	76
15.1.1 Tensió d'entrada 4 Vpp.....	77

15.1.2 Tensió d'entrada 8 Vpp.....	77
15.1.3 Tensió d'entrada 8,4 Vpp.....	78
15.2 Comportament des de l'instant t2.....	79
Capítol 16: Elecció dels components	81
16.1 Imant	81
16.2 Element Piezoelèctric.....	82
16.3 Circuit condicionador.....	83
16.4 Estructura	83

BLOC III: Prototip Energy Harvester..... 84

Capítol 17: Dispositius piezoelèctrics i EH300	85
17.1 Canvi de condensador	85
17.2 Prova amb diferents condensadors.....	86
17.2.1 Temps de càrrega	86
17.2.2 Temps de descàrrega.....	87
17.3 Càlculs de l'energia emmagatzemada	89
17.4 Node sensor.....	90
17.4.1 Estructura del circuit del Node sensor	90
17.4.2 Consum dels mòduls.....	91
17.4.3 Temps de presa de dades	92
Capítol 18: Dispositius piezoelèctrics, EH300 i fil elèctric	93
18.1 Disseny del prototip i muntatge	93
18.1.1 Disseny en CAD del prototip	93
18.1.2 Muntatge del prototip	94
18.2 Prova real	96
18.3 Temps de carrega/descàrrega	96
18.4 Temps de resposta.....	98
18.5 Prova amb un transmissor real	98
Capítol 19: Alternatives	102
Capítol 20: Conclusions del projecte	103
Capítol 21: Conclusions personals.....	104
Bibliografia	105
Índex de figures.....	106
Índex de taules	108

Resum

En aquest projecte es pretén implementar un dispositiu capaç de ser auto-suficient i no dependre de cap tipus de pila, bateria o fil elèctric que l'abasteixi d'energia elèctrica. El dispositiu recollirà la energia magnètica generada per la corrent elèctrica a un fil i la transformarà en energia elèctrica, que serà emmagatzemada per el seu posterior ús. A demès, aquest projecte s'ha desenvolupat en col·laboració amb un segon projecte, dintre del qual s'implementarà una xarxa de sensors, mitjançant el protocol MIWI. Aquest projecte es divideix en tres grans blocs. El primer bloc del projecte serà una introducció teòrica de tots els coneixements relacionats amb el concepte d'*energy harvesting* i els mecanismes físic implicats. Al segon bloc podrem veure com s'han realitzat els càlculs, simulacions i posada en marxa, dels diferents elements que formaran el dispositiu recollidor d'energia. Per últim en el tercer bloc veurem el prototip ja implementat. Es valoraran els resultats obtinguts, i es veuran els temps que necessitarà per alimentar al microcontrolador.

Resumen

En este proyecto se pretende implementar un dispositivo capaz de ser auto-suficiente y no depender de ningún tipo de pila, batería o cable eléctrico que lo abastezca de energía eléctrica. El dispositivo recolectará la energía magnética generada por la corriente eléctrica en un cable y la transformará en energía eléctrica, que será almacenada para su posterior uso. Además, este proyecto se ha desarrollado en colaboración con un segundo proyecto, dentro del cual se implementará una red de sensores, mediante el protocolo MIWI. Este proyecto se divide en tres grandes bloques. El primer bloque del proyecto será una introducción teórica de todos los conocimientos relacionados con el concepto de *energy harvesting* y los mecanismos físicos implicados. En el segundo bloque podremos ver como se han realizado los cálculos, simulaciones y puesta en práctica, de los diferentes elementos que formaran el dispositivo recolector de energía. Por ultimo en el tercer bloque veremos el prototipo ya implementado. Se valoraran los resultados obtenidos del dispositivo, y se verán los tiempos que necesitará para alimentar al microcontrolador.

Abstract

In this project we want to implement a device capable of being self-sufficient and that does not rely on any kind of batteries or electrical cable supplying the power. The device will collect the magnetic energy of an electric power cable and it will turn it into electric energy, which will be stored until next use. Furthermore, this project is been made in collaboration with another project, in which a sensor network by MIWI protocol will be implemented. This project splits up into three blocks. The first one will be a theoretical introduction of all the knowledge related with *energy harvesting* and the physical mechanisms involved. In the second block we will see how the calculation and simulation have been done and also we put into practice the different elements that will form the *energy harvesting* device. Finally, in the third block we'll see the yet implemented prototype. We will value the obtained results of the device, and we will also see the needed time to feed the microcontroller.

Capítol 1:

Introducció

Avui dia hi ha un fet que és innegable i que no pot portar a discussió, el fet que l'esser humà depèn dels recursos que ens ofereix la natura, especialment de l'energia. L'ús d'aquesta energia ha permès avui dia tenir una qualitat de vida superior.

Aquesta dependència que ha anat en augment durant les darreres dècades, no tan sols ha provocat enemistats entre països, sinó que ha arribat a provocar guerres. Un dels fets més deplorables que pot haver en un món com en el que vivim.

Un cop feta aquesta petita reflexió m'endinsaré en el contingut d'aquest document. Vist que l'energia o els recursos naturals tenen un paper tan important, pensem en com es pot reduir aquest consum excessiu d'aquests.

Imaginem una petita utopia on els dispositius electrònics arribessin a funcionar sense cap tipus de bateria, pila o fil elèctric que li subministrés energia. Aquest món idealitzat, consumiria menys recursos naturals, no tindria consumibles altament contaminants.

El concepte que pot portar a la realitat aquesta idea es coneix com *energy harvesting*. Aquest, es defineix com la recollida o aprofitament de la energia residual ambiental, que normalment és desaprofitada.

És per això que en aquest projecte tractaré de fer servir aquest procés per intentar aconseguir un dispositiu que sigui auto-alimentat, aprofitant el camp magnètic generat per el corrent elèctric d'un fil conductor. Per a complir un objectiu com el que es proposa, s'utilitzarà l'efecte electromagnètic i l'efecte piezoelèctric per la generació d'energia elèctrica.

Capítol 2:

Objectius

Aquest projecte de final de carrera parteix des de zero. Amb això vull dir que no es continua cap treball ja iniciat per alguna altre persona. En ell es presenten els càlculs, simulacions i disseny d'un sistema recaptador d'energia.

A mesura que avanci, s'aniran assolint petits objectius per així arribar a un objectiu final. Les petites metes que hem comentat, són per exemple: calcular tots els paràmetres d'un dels elements que es facin servir durant el projecte, comparar-los amb la realitat, fer simulacions, etc. D'aquesta manera es coneixeran els comportaments dels dispositius per separat.

Un cop es sap com es comporten els dispositius podrem procedir a fer un sol dispositiu el qual és realment l'objecte del projecte. Aquest és dissenyar un prototip de recol·lector d'energia que s'auto-abasteixi mitjançant el magnetisme que produeix un fil elèctric de la xarxa domèstica i mitjançant les vibracions presents a l'ambient. Amb aquest magnetisme induït s'ha de provocar el moviment oscil·lant d'un imant que alhora farà que mogui un element piezoelèctric de tipus cantilever, per així generar un camp elèctric al seu interior. Aquest produirà una corrent elèctrica que serà tractada a través d'un circuit condicionador que proporcionarà una tensió regulada un cop s'arribin a certs valors d'energia emmagatzemada.

Aquest projecte treballa amb col·laboració amb dos projectes finals de carrera més. L'objectiu del dispositiu que hem parlat en l'anterior paràgraf, serà el de abastir d'energia suficient com per alimentar a un microcontrolador que portarà el control d'una xarxa de sensors a través del protocol MIWI.

El segon projecte té la mateixa tasca que el nostre, però, obtenint energia solar més energia mecànica per vibracions.

BLOC I:

Introducció teòrica

Capítol 3:

Energy harvesting

3.1 Què és?

L'Energy harvesting o recollida d'energia, és el procés que es segueix per poder extreure energia de l'entorn que ens rodeja, per a poder alimentar altres dispositius que vulguem fer servir, i aquests no cal que siguin dispositius electrònics. La idea bàsica és que s'agafi una energia provinent del medi ambient o fonts artificials i es transformi en electricitat que pugui aprofitar un altre element.

Hi ha altres tipus d'energia que no provenen del medi ambient com per exemple les vibracions d'una rentadora. Tampoc cal que només sigui una font d'energia la que ens subministra, en pot ser més d'una. Ens pot subministrar l'energia mecànica i l'energia solar per exemple.

La idea bàsica amb la que ens hem de quedar, és que, *l'energy harvesting* és l'aprofitament d'energies les quals no els hi donem un ús i que es dissipen amb l'entorn. Es tracta d'emmagatzemar aquesta energia a través de supercondensadors o bateries i fer-la servir en altres dispositius que sí la puguin aprofitar.

3.2 Introducció històrica

Quan es parla dels recaptadors d'energia, sembla que estiguem parlant de l'actualitat i dels dispositius electrònics, però no és així. *L'energy harvesting* es pot remuntar als primers molins de vent, al Neolític, on ja es transformava l'energia eòlica en energia mecànica. Un altre exemple de recaptadors són els molins d'aigua, aquests daten de l'Imperi romà, aproximadament al segle I A.C. i transformaven l'energia hidràulica en energia mecànica.

Durant tota la història de la humanitat s'ha anat ideant sistemes per a l'aprofitament d'energia. Però sembla que és ara amb la revolució tecnològica quan hi estem treient encara més utilitats.

Actualment la tendència dels dispositius electrònics és la reducció de la seva mida i del seu consum. Això es possible gràcies a que els transistors estan reduint la mida del seu canal, a mides cada cop més petites. Aquí es mostra un exemple de com poden ser els microprocessadors d'un ordinador personal, en fem un petit repàs dels últims anys:

- 1999, tecnologia de canal de 250 nm
- 2004, tecnologia de canal de 90 nm
- 2006, tecnologia de canal de 65 nm
- 2008, tecnologia de canal de 45 nm
- 2011, tecnologia de canal de 22 nm

La llei de Moore ens diu que aproximadament cada 18 mesos es duplica el número de transistors en un circuit integrat. Es tracta d'una llei empírica, formulada per Gordon Moore, fins a l'actualitat s'ha pogut seguir perfectament, la figura 1 mostra dita llei. Aprofitant la reducció de mida i de consum sorgeix l'*energy harvesting*, que possibilita el desenvolupament de dispositius energèticament auto-suficients. La tensió d'alimentació d'aquests transistors es veu reduït.

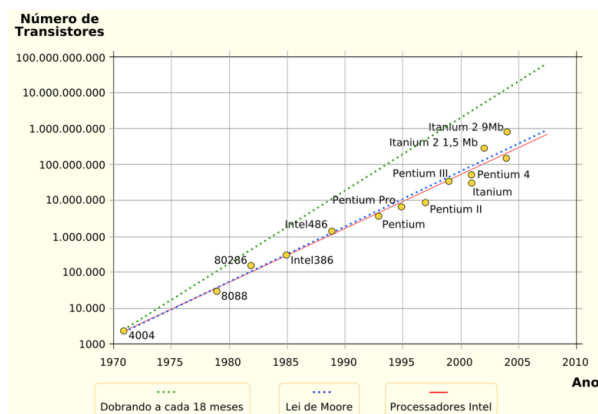


Figura. 1 Gràfica Llei de Moore

La figura 2 ens mostra una gràfica on es veu com la capacitat dels discs durs, la velocitat de la CPU, augmenta, però la densitat d'energia de les bateries no ha seguit el mateix increment que els altres aspectes de la informàtica.

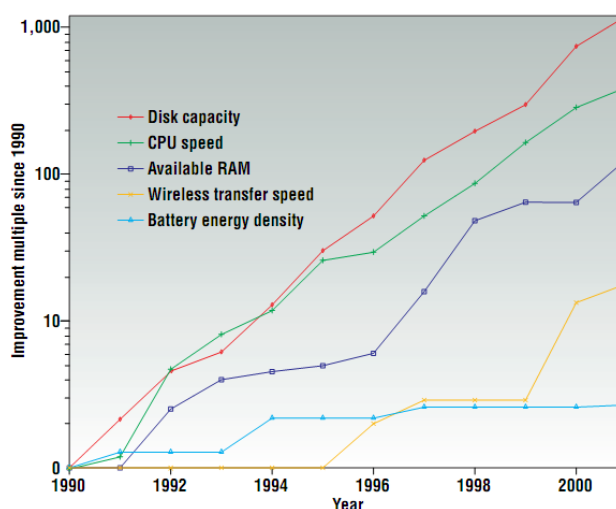


Figura. 2 Increment de diferents sistemes electrònics

No totes les fonts d'energia donen petites tensions que puguin alimentar petits dispositius, sinó que també existeixen altres tipus de recaptadors. Les preses d'aigua on hi ha dinamos molt grans que transformen l'energia hidràulica en elèctrica generen gran quantitat d'energia, la diferència romà en que quan es diu *energy harvesting* es refereix al petit consum.

No es pot datar exactament l'*energy harvesting* perquè sempre ha estat present durant l'evolució tecnològica de l'ésser humà.

3.3 Importància de l'*energy harvesting*

Un exemple ben clar serien les piles que alimenten els nostres dispositius sense fils. Quan comença a descompondre's la capa protectora que recobreix una pila de tipus botó, allibera metalls nocius i produeix una gran contaminació. El mercuri és el metall més nociu i en contacte amb l'aigua

produeix metil-mercuri compostat, que es concentra a les cadenes alimentàries produint greus desordres del sistema nerviós dels éssers vius.

Segons estudis especialitzats, una micropila de mercuri pot arribar a contaminar 600.000 litres d'aigua, una de zinc-aire 12.000 litres, una de òxid de plata 14.000 litres i una pila comú 3.000 litres d'aigua.

Les piles triguen molts anys en descompondre's, la majoria ho fan en 500 anys o inclús 1000 anys. La millor manera de tractar-les és el reciclatge. El procés s'inicia amb la trituració de la pila, després s'introdueixen en un destil·lador que per condensació recupera el mercuri.

Amb les bateries dels mòbils passa exactament el mateix, són molt contaminants i triguen molt en descompondre's. Per això, *l'energy harvesting*, ajuda a fer dispositius que siguin auto-suficients (que no requereixin piles sinó que es subministren ells mateixos l'energia) o que complementin l'alimentació d'un dispositiu, fent reduir així, l'ús de bateries o piles.

Quan més reduïm aquest consum desmesurat d'elements que contaminen moltíssim, podrem fer que el planeta sigui més sostenible.

3.4 Tipus de font d'energia

Un cop ja sabem què és *l'energy harvesting*, veurem quines són les fonts d'energia que podrem transformar. Primer es classifiquen entre fonts del medi ambient o naturals i fonts artificials.

3.4.1 Fonts mediambientals

Es classifiquen com a fonts mediambientals totes aquelles que ens proporciona la natura.

- Una de les més populars és la recol·lecció d'energia lumínica provinent del sol. Aquesta fa que els fotons que provenen del sol generen un parell electró-forat a un material semiconductor.
- Un altre, és per exemple, la hidràulica que genera un riu natural, aquesta pot transformar l'energia hidràulica en mecànica que alhora es pot transformar en energia elèctrica.
- Energia tèrmica, provinent també del sol, també es pot transformar en energia elèctrica.
- Energia eòlica, aquesta és un altre de les grans conegudes i que es fan servir molt. L'energia eòlica fa girar les aspes d'un moli de vent que a l'hora fa girar una dinamo que crea energia elèctrica.
- Un altre font d'energia, tot i que sembli inversemblant, és el cos humà. El cos humà quan camina està generant moviments periòdics que es poden transformar en energies elèctriques.

Com es pot veure hi ha molts tipus de fonts a la natura. Altres encara estan per investigar.

3.4.2 Fonts artificials

Ara veurem algunes de les fonts que generem artificialment i que desaprofitem, ja que l'objectiu de les fonts que els generen és un altre.

- Vibracions produïdes per electrodomèstics, maquinaria industrial, vehicles, trens, etc. Es pot treure molt partit d'aquest tipus de vibracions que no fem servir. Per exemple un tren, no para de vibrar a causa de la fricció amb les vies, si hi col·loquem transductors que transformin aquestes vibracions en energia elèctrica i s'emmagatzema la es pot fer servir per altres utilitats.
- Llum produïda per una bombeta, un fluorescent o qualsevol tipus de llum artificial. Aquest seria molt semblant a la que captem del sol, però aquest té la propietat de que es pot reciclar la llum artificial.
- Energia tèrmica provinent de per exemple, xemeneies industrials. Si col·loquem transductors dins de la xemeneia es pot extreure energia elèctrica a través del calor que s'hi produeix.
- L'electromagnetisme. L'electromagnetisme és un altre tipus de font que nosaltres generem. Fins i tot intentem evitar aïllar aquesta fonts perquè no afectin a altres dispositius. En el nostre cas el que ens interessa és precisament aprofitar aquest electromagnetisme. Les fonts poden ser antenes emissores o com en el nostre cas fils de la xarxa elèctrica.
- De determinats gasos, també es pot extreure energia, aquests fan que es produeixi una capa d'òxid en el transductor, cosa que fa que es creï una diferència de potencial.
- Es pot extreure energia a través de les vibracions acústiques, produïdes per exemple per un altaveu. Aquestes fan vibrar a un element piezoelèctric que transformaria aquestes vibracions en energia elèctrica.

Aquestes fonts que hem vist fins ara són les més comunes, però això no treu que no en puguin existir d'altres, i a mida que la tecnologia avanci encara traurem més fonts d'energia perquè es descobriran nous transductors.

3.5 Transductors

En aquest apartat es descriuran els diferents tipus de transductors que existeixen per les fonts d'energia.

Un transductor és un dispositiu capaç de transformar un tipus d'energia d'entrada en una de sortida diferent. Aquesta és la única tasca del transductor, com es tracti el que s'ha transformat es tasca del circuit condicionador. La llista que anem a nombrar a continuació només contindrà transductors, els quals passin de la font d'entrada a una sortida elèctrica.

Els transductors són els següents:

- Electromagnètics
- Electroquímics
- Fotoelèctrics
- Piezoelèctrics
- Termoelèctrics

3.6 Diagrama de blocs d'un *energy harvester*

A la figura 3 es veu el diagrama de bloc bàsic d'un recol·lector d'energia. Es pot veure que segons quina sigui la font d'energia i el tipus de transductor generarà una senyal AC o DC. En el cas del AC l'haurèm de rectificar per tornar-la DC per així poder-la tractar a la part del circuit condicionador.

Les sortides del recol·lector poden ser diferents, es pot emmagatzemar l'energia mitjançant condensadors, supercondensadors o bateries, d'aquesta manera podrem fer servir posteriorment aquesta energia emmagatzemada. Aquesta energia emmagatzemada pot fer-se servir per complementar alimentacions de sistemes o altres tipus d'aplicació.

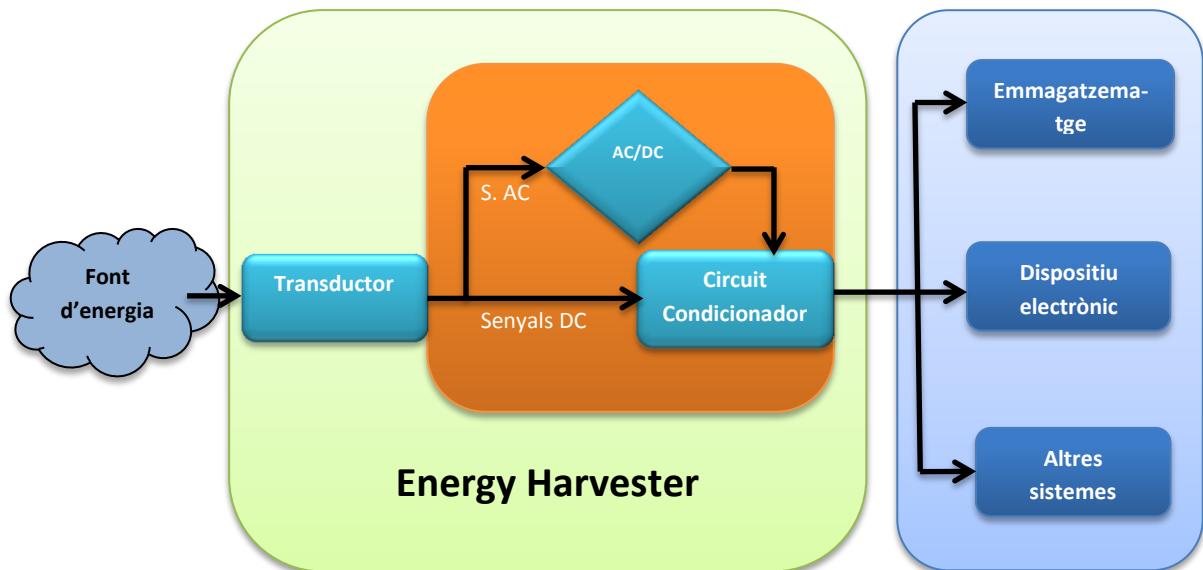


Figura. 3 Diagrama de blocs d'un Energy harvesting

Capítol 4:

Piezoelectricitat

4.1 Definició

La piezoelectricitat és la capacitat de certs materials de generar una diferència de potencial quan se'ls sotmet a una deformació mecànica. La paraula deriva del grec "*piezin*" que vol dir "esprèmer" o "estrènyer".

L'efecte piezoelèctric és reversible, els cristalls piezoelèctrics es poden deformar quan se'ls aplica una diferència de potencial externa. La deformació resultant és, però, molt petita; d'aproximadament un 0,1% de les dimensions originals.

Hi ha diversos cristalls que presenten efectes piezoelèctrics alguns poden ser, la Turmalina, el Quars i el Topazi, molts altres exhibeixen aquest efecte. Els materials piezoelèctrics, normalment, són ceràmiques ferroelèctriques amb l'estructura atòmica cristal·lina asimètrica, aquest fet és imprescindible per a l'aparició del fenomen piezoelèctric. Un exemple d'estructura cristal·lina, és la tipus Perovskita. A la figura 4 es pot veure com és l'estructura d'aquest material piezoelèctric.

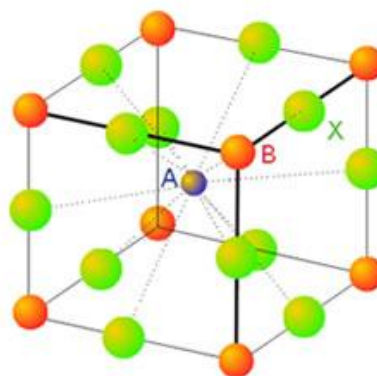


Figura. 4 Estructura molecular de Perovskita

Els cristalls es fan servir com a patrons de freqüència, quan la freqüència de ressonància mecànica dels mateixos és molt estable (per exemple, làmines convenientment tallades d'un cristall de quars), aquests cristalls, al vibrar generen una tensió proporcional a l'amplitud de la vibració, i de la mateixa freqüència que aquesta.

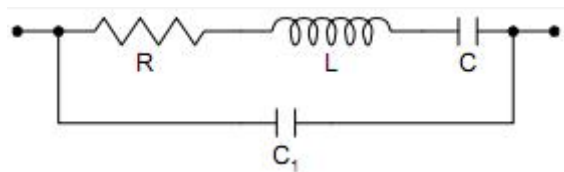


Figura. 5 Circuit equivalent d'un cristall piezoelèctric

Previstos d'elèctrodes convenientes, tenen les característiques d'un circuit ressonant de molt alt Q i alta relació L/C. S'utilitzen en circuits de filtres o com elements de realimentació selectiva en circuits oscil·ladors, entre d'altres aplicacions. El circuit equivalent d'un cristall el es pot veure a la figura 5.

La capacitat en paral·lel C_1 correspon a els elèctrodes i al cablejat. Pot arribar a tindre un valor important. Aquesta capacitat fa que el cristall presenti dos modes de ressonància: una de ressonància sèrie f_s i un altre en paral·lel f_p com es pot veure a la figura 6. Entre les dos hi sol haver una diferència de l'ordre de 1 a 2 KHz. Normalment es fa servir el mode de ressonància sèrie.

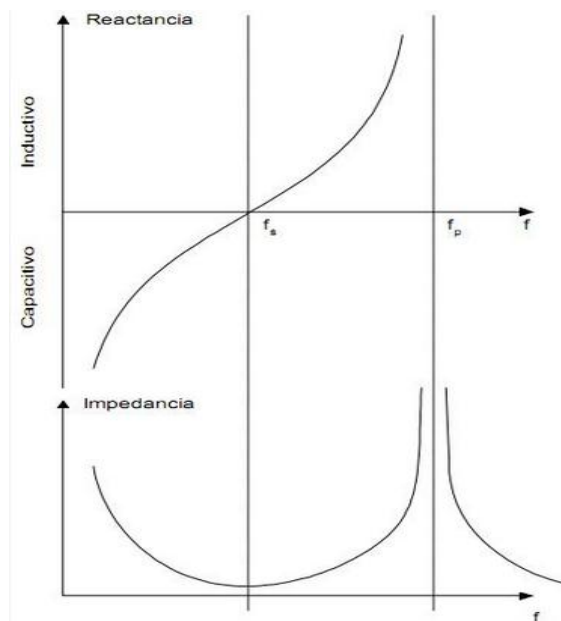


Figura. 6 Gràfiques de comportament del circuit ressonant

4.2 Història

La primera demostració experimental d'una connexió entre els fenòmens macroscòpics piezoelèctrics i l'estructura cristal·logràfica, va ser publicada al 1880 per Pierre i Jacques Curie. El seu experiment va consistir, en un mesurament de les càrregues superficials que apareixen en els cristalls especialment preparats (turmalina, quars, topazi, canya de sucre i sal de Rochelle, entre d'altres), que van ser sotmeses a esforços mecànics. Aquests resultats van donar crèdit a la imaginació dels Curie i la perseverança, tenint en compte es varen obtenir amb res més que paper d'alumini, cola, filferro, imants i una serra de joier.

En els cercles científics de l'època, aquest efecte es va considerar tot un descobriment. Ràpidament va ser anomenat com piezoelectricitat, per tal de distingir-la d'altres àrees de l'àmbit científic. Com ara electricitat de contacte (electricitat estàtica generada per la fricció) i la piroelectricitat (electricitat generada a partir de vidres per escalfament).

El que els germans Curie no varen descobrir va ser que els cristalls que exhibeixen l'efecte piezoelèctric directe (electricitat per la tensió aplicada), també presentaven l'efecte invers (tensió aplicada en resposta al camp elèctric). Aquesta propietat es dedueix matemàticament a partir de principis termodinàmics fonamentals que va descobrir Gabriel Lippmann al 1881.

El primer treball seriós sobre les aplicacions dels dispositius piezoelèctrics es va dur a terme durant la Primera Guerra Mundial al 1917. P. Langevin va començar a perfeccionar un detector d'ultrasons submarins. El seu transductor era un mosaic de fins cristalls de quars enganxats entre dues plaques d'acer (el compost té una freqüència de ressonància d'aproximadament 50 KHz), muntats en un allotjament adequat per a la immersió.

La importància estratègica del seu èxit no va ser passat per alt per qualsevol nació industrialitzada, però, i des de llavors el desenvolupament de transductors del sonar, circuits, sistemes i materials mai a cessat. L'èxit del sonar va estimular l'activitat de desenvolupament en tot tipus de dispositius piezoelèctrics, tan ressonants com no ressonants.

Durant la Segona Guerra Mundial, els Estats Units, Japó i la Unió Soviètica i alguns grups aïllats de recerca, varen treballar en la millora dels materials condensadors descoberts i que certs materials ceràmics van mostrar constants dielèctriques de fins a 100 vegades superiors que els vidres de tall comuns. El descobrir la facilitat per fabricar ceràmiques piezoelèctriques amb les característiques sorprenents mencionades, provocar un ressorgiment d'una intensa recerca i el desenvolupament dels dispositius piezoelèctrics.

Entre el 1965 i el 1980 els fabricants japonesos van desenvolupar ràpidament diversos tipus de filtres de senyals piezoelèctrics, que van abordar les necessitats que varen sorgir, com ara, la televisió, la ràdio, i els mercats d'equips de comunicacions; encenedors piezoelèctrics per al gas natural / butà.

Els mercats d'aquests productes va continuar creixent. Els més notables van ser els bronzidors d'àudio (detectors de fum, generadors de tons compatibles TTL), transductors ultrasònics d'aire (controls remots de televisió i alarmes d'intrusió) i dispositius de filtre SAW (dispositius d'ones acústiques, que podien aconseguir senyal d'alta freqüència de filtratge). En comparació amb l'activitat comercial al Japó, la resta del món era lent, fins i tot en declivi. A nivell mundial, però, encara quedava molta feina de recerca pionera. L'èxit comercial dels esforços japonesos ha atret l'atenció de la indústria en moltes altres nacions i estimula un nou esforç per desenvolupar amb èxit productes piezoelèctrics. Avui dia trobem dispositius piezoelèctrics a tot arreu sense que ens donem compte, encara falten molts descobriments per a fer.

4.3 Polarització

Els materials piezoelèctrics poden ser naturals o artificials. Els naturals són els que presenten el fenomen de la piezoelectricitat sense haver de sotmetre'ls a cap tipus de tractament extrínsec. Els altres materials denominats ferroelèctrics han de ser sotmesos a un tractament específic per presentar característiques piezoelèctriques. Aquest tractament és el de la polarització.

La polarització té a veure amb l'alineació dels pols dels cristall components. El procediment és necessari perquè al ser inicialment manufacturat, el material piezoelèctric té els pols dels seus cristalls disposats de manera aleatòria. En aquestes condicions, tendeixen a anul·lar-se els uns amb els altres, i majoritàriament no responen a les característiques que s'han comentat. Perquè això passi, els pols dels cristalls han d'estar permanentment alineats els uns amb els altres, en un procés de polarització.

Una característica dels materials piezoelèctrics, és que, posseeixen una temperatura de Curie (temperatura per sobre la qual un material ferromagnètic perd les seves propietats, es converteix en paramagnètic i el material piezoelèctric perd la seva polarització elèctrica espontània).

Sotmès el material a una temperatura més elevada que la de Curie, els pols dels cristalls poden canviar d'orientació mantenint el material dins de la seva fase sòlida. Existeixen materials PZT durs, amb una temperatura de Curie per sobre dels 300 graus C. Són difícils de polaritzar, excepte a temperatures elevades.

Quan el material piezoelèctric està per sobre de la seva temperatura de Curie, se li aplica un camp elèctric molt gran, parlem de varis milers de volts, que obliga a l'alineament dels pols. Si es manté el camp elèctric i es disminueix la temperatura lentament, s'aconsegueix que la polarització es conservi. Un cop fet això es pot dir que el material està polaritzat.

A la figura 7 es pot veure el procés gràfic de polarització. A la primera figura 7 (a), els pols del cristall estan aleatòriament posicionats. A la figura 7 (b) se li aplica el camp elèctric amb una temperatura superior a la de Curie del material, els pols es col·loquen en posició. Per últim a la figura 7 (c), un cop tret el camp elèctric els pols es mantenen gairebé amb la posició que tenien durant el procés del camp elèctric.

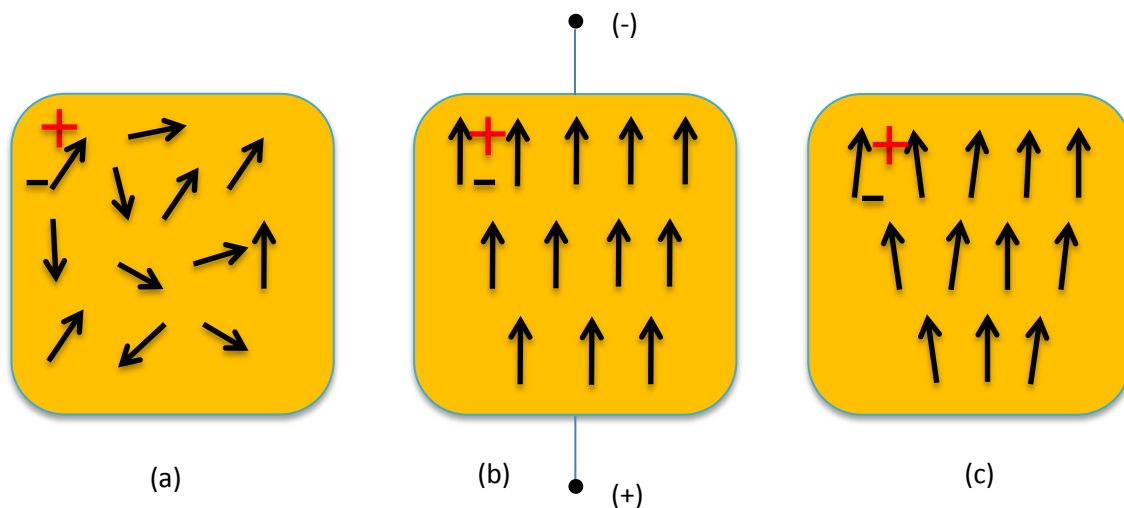


Figura. 7 Procés de polarització

A la figura 8 es veu el cicle d'histerèsis de la polarització d'un material ferromagnètic. Com es pot veure segons el sentit del camp elèctric polaritzarem els pols cap a un sentit o cap a l'altre.

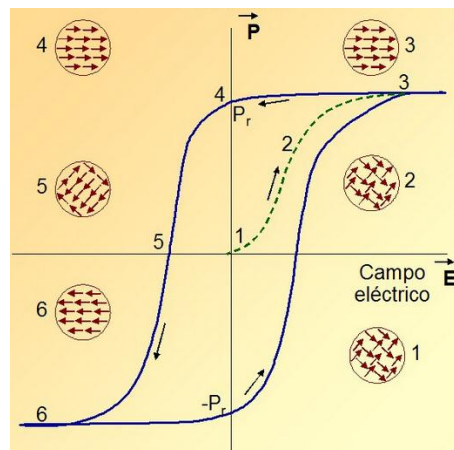


Figura. 8 Cicle d'histerèsis de la polarització

4.4 Equacions característiques

Aquestes equacions descriuen, la polarització elèctrica que apareix en el material al aplicar una tensió mecànica i l'aparició d'una deformació elàstica al aplicar en el material un camp elèctric. Les equacions que caracteritzen els materials piezoelèctrics són les següents:

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

On:

D= desplaçament elèctric [C/m^2]

ε = permitivitat dielèctrica

E= camp elèctric [V/m]

$$S = s \cdot T \quad (2)$$

On:

S= deformació mecànica [adimensional]

s= coeficient d'elasticitat [m^2/N]

T= Tensió o esforç mecànic [N/m^2]

En els materials piezoelèctrics els dos fenòmens descrits anteriorment succeeixen al mateix temps, és a dir, la deformació i el desplaçament, depenen de les tensions mecàniques i del camps elèctric aplicat. De manera que es pot obtenir les següents relacions entre càrrega i deformació de forma matricial:

$$D = dT + \varepsilon_0 \chi E \quad (3)$$

$$S = Ts + dE \quad (4)$$

On:

d= coeficient de deformació piezoelèctrica [m/V]

χ = susceptibilitat elèctrica

4.5 Constants i coeficients piezoelèctrics

Coeficient de deformació piezoelèctrica

Expressa la capacitat del material per deformar-se sota l'acció d'una tensió elèctrica. En l'efecte piezoelèctric directe, representa la densitat de càrrega generada per la força aplicada al material.

$$d = \left(-\frac{dD}{dT} \right)_E = \left(\frac{de}{dE} \right)_T \quad [\text{m/V}] \quad (5)$$

e = deformació elàstica

Coefficient de tensió piezoelèctrica

Expressa la capacitat per generar una tensió elèctrica entre les seves cares quant es sotmès a una deformació elàstica.

$$g = \left(-\frac{dE}{dT} \right)_D = \left(\frac{dT}{dE} \right)_e \quad [\text{m}^2/\text{C}] \quad (6)$$

Coefficient d'acoblament k

Una propietat important de l'efecte piezoelèctric en aplicacions pràctiques és la efectivitat en convertir energia elèctrica en mecànica i a la inversa. Aquest fet queda reflectit en el coeficient d'acoblament k definit com:

$$k^2 = \frac{\text{Energia elèctrica convertida a energia mecànica}}{\text{Energia elèctrica d'entrada}} \quad (7)$$

Constant dielèctrica

La constant dielèctrica relativa, és la relació de la permitivitat del material, a la permitivitat de l'espai lliure. En la condició sense restriccions, és a dir, molt per sota de la ressonància mecànica de la peça.

$$K = \frac{\text{Permitivitat del material}}{\text{Permitivitat de l'espai}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (8)$$

Capacitància

La capacitància és una magnitud física que defineix la facultat d'un cos per emmagatzemar càrrega elèctrica. El cas més bàsic, és el de una capacitat pla-paral·lela. Composta per dos plaques metàl·liques separades per un dielèctric.

$$C = \frac{K \cdot \epsilon_0 \cdot A}{t} \quad (9)$$

A = àrea

t = distància entre les plaques

Temperatura de Curie

És la temperatura per sobre la qual un material ferromagnètic perd les seves propietats i es converteix en paramagnètic. El material piezoelèctric perd la seva polarització elèctrica espontània.

4.6 Dispositius piezoelèctrics en paral·lel i en sèrie

Existeixen dos possibles maneres de connectar els piezoelèctrics, aquestes són en sèrie o en paral·lel. Com l'element piezoelèctric és un element capacitiu, comparteix les mateixes propietats que un condensador quan s'associen en sèrie o paral·lel.

Per tant quan es connecta un dispositiu piezoelèctric en sèrie la capacitat total es veu simplificada per l'expressió (10), per tant quan estan connectats en aquesta configuració la tensió és el doble, però la intensitat és la mateixa que si només hi hagués un sol al circuit.

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (10)$$

Per un altre banda quan es connecten en paral·lel presenten les característiques inverses, les capacitats es sumen directament com es pot veure a l'expressió (11), per tant amb aquesta configuració la intensitat que aporta cada dispositiu piezoelèctric es veu sumada però la tensió és la mateixa per tots. A la figura 9 es pot veure una figura amb aquesta explicació.

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (11)$$

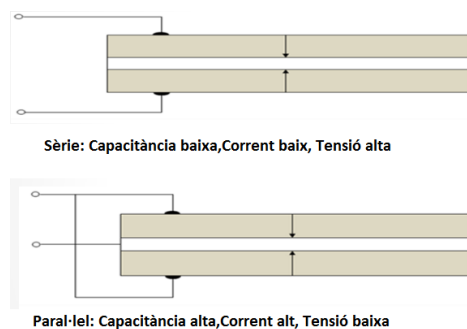


Figura. 9 Connexió Sèrie/Paral·lel

Capítol 5:

Cantilever

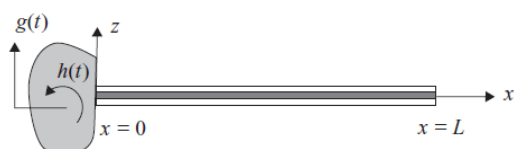


Figura. 10 Exemple de cantilever

En aquest apartat es pretén explicar les expressions matemàtiques que descriuen els moviments que realitzen els cantilevers. A la figura 10 es pot veure un exemple de cantilever.

Un Cantilever és una biga ancorada per un sol extrem. La biga porta la càrrega al suport on el qual és resistit per el moment i l'esforç tallant. La construcció en tipus cantilever permet dissenyar estructures que sobresurten sense reforços externs.

Aquest tipus d'estructura està en contrast amb una biga simplement recolzada, com ara les que es troben en un sistema de pal i llinda. Una biga simplement recolzada està suportada pels dos extrems amb càrregues aplicades entre els suports.

Per la millora de la comprensió dels càlculs que es presenten, els farem directament sobre un material específic com és el PZT (Plom Zirconat Titanat), aquest és un dels materials més comuns entre els elements piezoelèctrics.

5.1 Models matemàtics

Diversos mètodes de modelització s'han aplicat per estudiar les característiques dinàmiques de l'estructura. La majoria dels treballs publicats han aplicat un circuit elèctric equivalent per representar les característiques de l'estructura, que no reflecteix la veritable dinàmica de l'estructura.

Per tant, un nou enfocament basat en la combinació d'Euler-Bernoulli i l'equació de Timoshenko de les bigues, s'ha desenvolupat per la bimorph (dos capes de material piezoelèctric separades per un altre material) PZT, tenint en compte les propietats del material juntament amb la potència del circuit de conversió. La figura 11 mostra un diagrama esquemàtic d'un cantilever PZT.

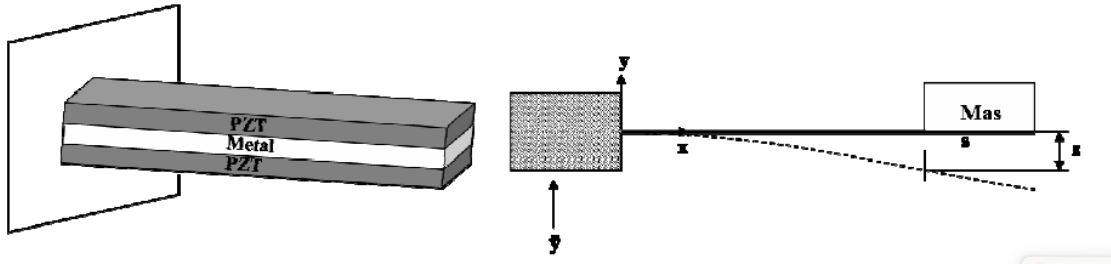


Figura. 11 Esquema dinàmic cantilever PZT

Els següents apartats descriuen el desenvolupament de tres model matemàtics per al dispositiu. El primer model està basat en un circuit elèctric equivalent del model mecànic. La segona combina la teoria d'Euler-Bernoulli i Timoshenko de la biga. L'última utilitza la conservació de l'energia en el feix, juntament amb un model mecànic de graus simple.

5.1.1 Mòdul de Young

És un paràmetre que caracteritza el comportament d'un material elàstic, segons la direcció en la que se'l hi aplica una força. Ve donat per l'expressió (12), que és per el cas de una biga elàstica de secció rectangular.

$$E = \frac{4 \cdot k \cdot L^3}{t^3 \cdot W} \quad (12)$$

On:

k = coeficient elàstic del material

L = llargada del material

W = ample del material

t = gruix del material

5.1.2 Freqüència de ressonància d'un cantilever

Degut a l'equivalència a un circuit elèctric que fem referència a l'apartat 4.1, el circuit presenta un freqüència de ressonància.

La freqüència de ressonància, per una estructura tipus cantilever rectangular es pot expressar com:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (13)$$

On:

k = coeficient d'elasticitat del material

m = massa del material

5.2 Circuit elèctric equivalent

La figura 12 mostra un model de circuit elèctric equivalent per a una biga PZT, on una font està connectada en sèrie amb una inductància, una resistència i un condensador que constitueixen un circuit ressonant. El transformador d'adaptació representa la tensió, mentre que el condensador indica la inherent capacitància del dispositiu.

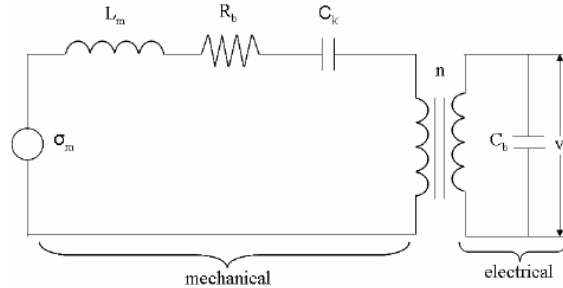


Figura. 12 Circuit elèctric equivalent

El circuit pot ser descrit fent servir la llei de tensions de Kirchhoff:

$$\sigma_{in} = L_m \varepsilon + R_b \varepsilon' + \frac{\varepsilon''}{C_k} + nV \quad (14)$$

El circuit equivalent condueix a la correlació entre la deformació i la tensió.

$$\varepsilon'' = \frac{-Y}{k_1 k_2 m} \varepsilon - \frac{b_m}{k_1 m} \varepsilon' + \frac{Y}{k_1 k_2 m} \frac{d_{31}}{2t_c} V + \frac{y''}{k_2} \quad (15)$$

$$V = \frac{n_p t_c d_{31} Y}{\varepsilon} \varepsilon'' \quad (16)$$

On ε' i ε'' , són la primera i segona derivada de la deformació.

5.3 Teoria d'Euler-Bernoulli i Timoshenko de la biga

L'anàlisi estàtic d'un sensor piezoelèctric cantilever, es realitza típicament mitjançant l'ús de els càlculs emprats per a la desviació d'una bimorph tèrmica proposta per Timoshenko. El principi es basa en la compatibilitat entre la deformació de tres bigues cantilever unides al llarg de l'eix. A causa de les forces aplicades per una o totes les capes, l'estructura es deriva d'un estat d'equilibri estàtic. L'estructura és considerada un piezoelèctric heterogeni bimorph, on dues capes piezoelèctriques estan unides a banda i banda d'una capa elàstica, com per exemple, de llautó.

La figura 13 mostra una geometria de tres multi-morph. Un llautó amb una elasticitat pura s'intercala entre les capes superior i inferior del material PZT. El modelatge d'aquesta estructura deixa de banda els efectes de tall residual, i ignora l'estrès induït per la curvatura.

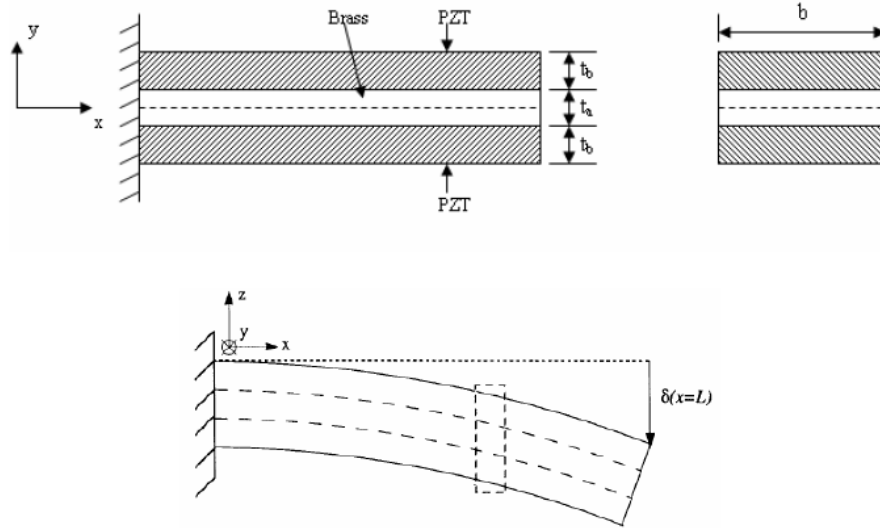


Figura. 13 Geometria multi-morph

A més, el radi de la curvatura de totes les capes suposa aproximadament ser la mateixa a les de l'estructura, simplement a causa de la suposició que el gruix és molt menor que el de la curvatura del feix en general. La deformació total en la superfície de cada capa és la suma de les tensions causades pel efecte piezoelèctric, la força axial i la flexió. Es fa notar que el senyal de la tensió superficial depèn de la curvatura de la part superior o superfície inferior de la capa.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{piezo} + \varepsilon_{axial} + \varepsilon_{bend} = d_{31}E_i + \frac{F_i}{A_i Y_i} \pm \frac{t_i}{2r} \quad (17)$$

ε_{piezo} en l'equació constitutiva lineal considera el coeficient d'acoblament piezoelèctric transversal d_{31} i el camp elèctric a través del gruix de la capa E_i per a un material piezoelèctric t_1 i t_3 , són el gruix de la capa PZT i t_2 és l'espessor del centre. A_i és l'àrea de la capa corresponent i Y_i és el mòdul de Young d'elasticitat.

Per tant el radi de curvatura està donat pel terme:

$$\frac{1}{r} = \frac{2d_{31}DA^{-1}C}{2 - DA^{-1}B} \quad (18)$$

On:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1 Y_1} & -\frac{1}{A_2 Y_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_2 Y_2} & \frac{-1}{A_3 Y_3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} t_1 + t_2 \\ t_2 + t_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} -E \\ E \\ 0 \end{bmatrix}$$

D'altra banda, de la teoria de la biga d'Euler-Bernoulli es descriu la relació entre el radi de curvatura i la força aplicada, la qual està donada per la següent equació.

$$\rho A \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial t^4} + YI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = F(t) \quad (19)$$

On ρ és la densitat, I és el moment d'inèrcia i $F(t)$ és la força aplicada.

La solució general per aquesta equació ve donada per:

$$w(x, t) = \sum q_i(t) X_i(x) \quad (20)$$

On el desplaçament i la vibració ve expressada per:

$$X_i(x) = \cosh(\beta_i x) - \cos(\beta_i x) - \frac{\sinh(\beta_i L) - \sin(\beta_i L)}{\cosh(\beta_i L) + \cos(\beta_i L)} (\sinh(\beta_i x) - \sin(\beta_i x)) \quad (21)$$

$$q_i(t) = \frac{1}{\omega_{di}} e^{-\zeta \omega_{ni} t} \int_0^t F_i(\tau) e^{-\zeta \omega_{ni} \tau} \sin(\omega_{di}(t - \tau)) d\tau \quad (22)$$

$$\beta_i^4 = \frac{\omega_{ni}^2}{C^2} \quad (23)$$

ω_n és la freqüència natural obtinguda resolent l'equació transcendental.

$$\cosh(\beta_i L) \cos(\beta_i L) + 1 = 0 \quad (24)$$

El radi de curvatura ve donada per les expressions següents:

$$r = \frac{1}{2w(L)} L^2 \quad (25)$$

On:

$$\frac{1}{r} = w(x) \quad (24) \quad i \quad w(x) = \frac{1}{2r} x^2 \quad (26)$$

Per tant, substituint el radi de curvatura en l'equació (6), el voltatge produït per el PZT Bender esta donat per:

$$V = \frac{2w(L)t_p}{L^2} \frac{2 - DA^{-1}B}{2d_{31}DA^{-1}} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (28)$$

5.4 Conservació de la energia

El principi es basa en el fet que l'energia total del PZT bender emmagatzemat és igual a la suma de l'energia mecànica aplicada a la biga i l'energia elèctrica a les càrregues que són aplicades per el camp elèctric. Quan una tensió mecànica és aplicada, l'energia emmagatzemada al nivell PZT, és la suma de l'energia mecànica i l'energia del camp elèctric induït. Així, l'energia emmagatzemada en una capa PZT s'expressa de la manera següent:

$$U_u = \frac{1}{2} (s_{11}^E \sigma_1 - d_{31} E_3) \sigma_1 = \frac{1}{2} s_{11}^E \sigma_1^2 \quad (29)$$

On σ és l'estrès, s és la matriu de rigidesa.

Per un altre banda, l'energia en la capa de metall es pot expressar com una equació simple, degut a la falta de camp elèctric de la següent manera:

$$U_m = \frac{1}{2} s_m \sigma_1^2 \quad (30)$$

L'energia total de la biga s'expressa com:

$$U_{total} = \int_0^L \int_0^W \left(\int_{\frac{t_1}{2}}^{\frac{t_2}{2}+t_1} dU_u dz + \int_{-\frac{t_2}{2}}^{\frac{t_2}{2}} dU_m dz \int_{-\frac{t_2}{2}-t_3}^{-\frac{t_2}{2}} dU_1 dz \right) dy dx \quad (31)$$

Per un altre banda, el camp elèctric ve donat per

$$E = \frac{V}{2t_3} \quad (32)$$

L'energia elèctrica total és igual a un producte de la càrrega i el voltatge. Així, la càrrega generada a la biga s'obté per un derivada parcial de l'energia amb respecte a la tensió.

$$Q = \frac{\partial U_{total}}{\partial V} = -3 \frac{d_{31} s_m (t_2 + t_3) L^2}{X} F_0 \quad (33)$$

La capacitància del material piezoelèctric es descriu com la relació entre la tensió i la càrrega en el material piezoelèctric, d'aquí la capacitància C_{free} de la biga es pot trobar, on no s'aplica la càrrega.

$$C_{free} = \frac{v_{33}^T W L}{2t_3} \left(1 + \frac{(6s_m t_3 (t_2 + t_3)^2 - X) K_{31}^2}{X} \right) \quad (34)$$

On K_{31} és coeficient d'acoblament.

Així, el voltatge generat es troba com una funció de la força aplicada.

$$V = \frac{Q}{C_{free}} = - \frac{6d_{31} s_m t_3 (t_2 + t_3) L}{v_{33}^T W X \left(1 + \left(\frac{6s_m t_3 (t_2 + t_3)^2}{X} - 1 \right) K_{31}^2 \right)} F_0 \quad (35)$$

L'estructura esquemàtica de un sensor es mostra a la figura 12, on s'uneix una massa a l'extrem lliure de la biga en voladís bimorph PZT, que està fixat a una base vibratòria. Llavors, l'estructura pot ser modelada amb un únic grau de llibertat, del que únicament es compona d'una proba de massa M , un ressort amb rigidesa K , un esmorteïdor amb un coeficient C d'esmorteïment i una base vibratòria.

El model resultant equivalent es mostra a la figura 14. Per tant, $y(t)$ és el moviment de la base de vibració, i $z(t)$ és el moviment relatiu entre la base vibratòria i la massa de proba. La massa pot ser expressada per l'equació següent:

$$M = \frac{33}{140} M_{biga} + M_{final} \quad (36)$$

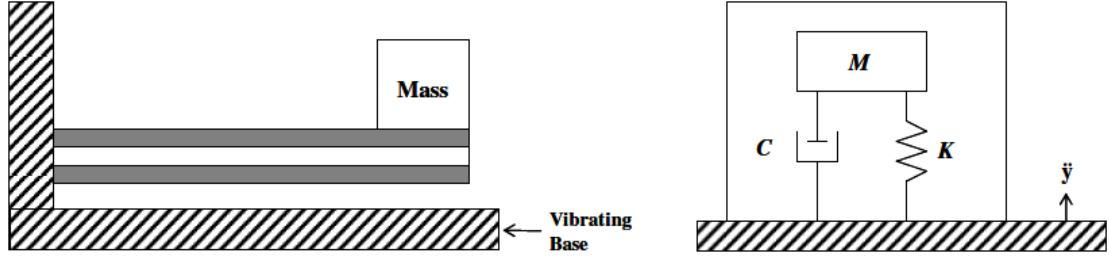


Figura. 14 Estructura esquemàtica de un sensor

Segons la segona llei de Newton, el model mecànic es deriva de la següent manera:

$$Mz'' + Cz' + Kz = -My'' \quad (37)$$

Una funció de transferència entre l'acceleració d'entrada i el desplaçament de sortida es pot obtenir en el pla de Laplace amb les condicions inicials: $z(0) = z' = 0$, on $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$, $\zeta =$ coeficient d'esmoreïment

$$\left| \frac{Z(s)}{Y''(s)} \right| = \frac{1}{s^2 + (2\zeta\omega_n)s + \omega_n^2} \quad (38)$$

Així, el responsable de la força F_0 a la biga s'obté després de $Z(t)$ i $Z''(t)$, es resol a partir de:

$$F_0(t) = M_{final} \times Z''(t) \quad (39)$$

Per últim la tensió obtinguda es pot saber a partir de:

$$V = - \frac{6d_{31}s_mt_3(t_2 + t_3)L}{v_{33}^T W X \left(1 + \left(\frac{6s_mt_3(t_2 + t_3)^2}{X} - 1 \right) K_{31}^2 \right)} M_{final} \times Z''(t) \quad (40)$$

Capítol 6:

Magnetisme

Es coneix com a magnetisme aquell fenomen físic per el qual els materials exerceixen forces, ja sigui d'atracció o de repulsió, sobre altres materials amb els que interactuen. Tots els materials, alguns en major grau i d'altres en un menor grau, reben la influència d'un camp magnètic, per tant, materials molt coneguts per tots nosaltres com el Níquel, Ferro, Cobalt i les seves corresponents aliatges denominades imants presenten propietats magnètiques detectables.

El magnetisme també expressa altres tipus de manifestacions dins de la física, especialment com un dels components de la ona electromagnètica, que forma la llum.

El magnetisme consisteix en el següent: cada electró, per naturalesa és un petit imant. Comunament una gran quantitat d'electrons conformats per un determinat material, es troben orientats aleatòriament en diferents direccions. A un imant tots els electrons tendiran a orientar-se cap a la mateixa direcció, generant una força magnètica al voltant.

Una qüestió a tindre en compte és que sempre el comportament magnètic que sostingui un material dependrà de l'estructura material que aquesta tingui i de la seva configuració electrònica.

6.1 Camp magnètic

El camp magnètic és una regió de l'espai en la qual una càrrega elèctrica puntual de valor q , que es desplaça a una velocitat \mathbf{v} , sofreix els efectes d'una força que es perpendicular i proporcional tant a la velocitat \mathbf{v} com al camp \mathbf{B} . Així, dita càrrega percebrà una força descrita amb la següent igualtat:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (41)$$

On \mathbf{F} és la força, \mathbf{v} és la velocitat i \mathbf{B} el camp magnètic, també denominat inducció magnètica i densitat de flux magnètic. A la figura 15 es veu una imatge d'un típic experiment on es col·loquen petits dipòls ferromagnètics al voltant d'un imant de barra. Es pot apreciar com el camp magnètic afecta aquests petits elements fèrrics i es veu la forma del camp magnètic de com és un element que surt d'un pol i va a parar a l'altre pol.

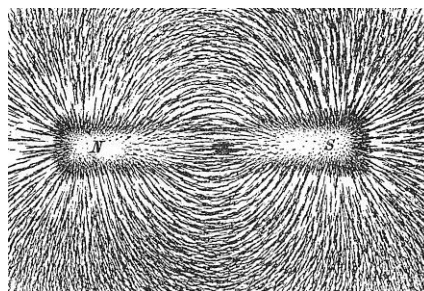


Figura. 15 Camp magnètic d'un imant

6.2 Magnetització

Sabem que la matèria està constituïda per àtoms i molècules. El model més simple d'àtom considera que està format per un nucli positiu, amb protons i neutrons, i electrons que giren al seu voltant. Així, doncs, es pot imaginar que els electrons, quan es mouen al voltant del nucli, constitueixen un petit circuit elèctric (espira de corrent).

Com que els circuits elèctrics generen camps magnètics, es pot suposar que el moviment orbital dels electrons produeix un camp magnètic. Però els electrons, a més de girar al voltant del nucli, tenen un moviment de rotació intrínsec, que també contribueix a la creació del camp magnètic, perquè constitueix un altre petit circuit elèctric.

Sense entrar en gaires detalls, es pot concloure que els electrons lligats als àtoms creen un camp magnètic. Cadascun dels àtoms, o de les molècules, està caracteritzat, des del punt de vista magnètic, pel moment magnètic, \vec{m} , que entenem que és la suma de totes les contribucions electròniques.

Com l'estudi del magnetisme en la matèria l'abordarem des del punt de vista macroscòpic, és convenient definir una magnitud, anomenada magnetització, \vec{M} , com el moment magnètic per unitat de volum. La magnetització és:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dv} \quad (42)$$

On dv és un volum elemental d'un material en què hi ha N àtoms o molècules, cadascun amb un moment magnètic.

Quan en un material la magnetització no és nul·la, es diu que està magnetitzat. Per exemple, un imant és un material magnètic magnetitzat; la seva magnetització no és nul·la.

La magnetització d'un material té un valor màxim, que correspon a la situació en què tots els moments atòmics estan alineats. En aquest cas es diu que el material està saturat i la seva magnetització s'anomena magnetització de saturació, i depèn de la temperatura.

6.3 Camp magnètic produït per un material magnetitzat

Suposem un material magnetitzat: això vol dir que la magnetització no és nul·la en tots els punts del material. Per calcular el camp magnètic produït en qualsevol punt de l'espai P , es pot descompondre el volum del material en elements diferencials de volum i associar a cadascun d'aquests elements de volum un moment magnètic que val $d\vec{m} = \vec{M}dv$. Cadascun dels moments magnètics el es pot interpretar com una espira elemental de corrent.

Abans de calcular el camp magnètic \vec{B} , hem de descriure les següents expressions.

Densitat de corrent superficial: $\vec{\lambda}_e = \vec{M} \times \vec{n}$ (43)

Densitat de corrent de volum: $\vec{J}_e = \vec{\nabla} \times \vec{M}$ (44)

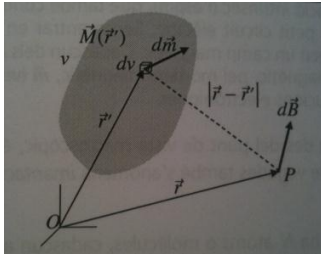


Figura. 16 Sistema de vectors

Aquestes magnituds s'anomenen corrents equivalent d'Ampère. A la figura 16 es pot veure gràficament els vectors que actuen a les següents expressions.

Així formalment, el càlcul del camp magnètic produït per un material magnetitzat es redueix al càlcul del camp magnètic produït pels corrents equivalents d'Ampère. Per tant, el potencial vector el es pot expressar així:

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{\lambda}_e}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds + \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J}_e}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv \quad (45)$$

Si coneixem \vec{A} , es pot calcular el camp magnètic, mitjançant la relació $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ si ho fem obtenim:

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{\lambda}_e \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} ds + \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J}_e \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv \quad (46)$$

De l'anterior expressió es pot deduir que:

$$0 = \vec{\nabla} \cdot \vec{B} \quad (47)$$

És a dir, el camp magnètic en presència de materials magnètics continua sent solenoïdal.

També aprofitarem per introduir un altre element com és el camp d'excitació magnètica, la seva expressió és la següent:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \quad (48)$$

Aquesta expressió ens dona una relació entre el camp magnètic i la magnetització.

6.4 Susceptibilitat i permeabilitat magnètiques

Per resoldre problemes en què intervenen materials magnètics cal tenir una relació entre la magnetització i el camp d'excitació. Aquesta relació, de forma general, la es pot escriure així:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (49)$$

On χ_m és una magnitud adimensional que s'anomena susceptibilitat magnètica. En general, té caràcter tensorial. Això vol dir que la magnetització i el camp d'excitació no han de ser necessàriament dos vectors paral·lels. La susceptibilitat indica la capacitat que té un material de magnetitzar-se sota l'acció d'un camp magnètic aplicat. A causa de l'agitació tèrmica, la susceptibilitat magnètica és una magnitud que depèn de la temperatura.

6.5 Susceptibilitat en funció de la temperatura

La susceptibilitat dels materials diamagnètics es manté pràcticament constant amb la temperatura. En canvi, experimentalment s'ha vist que la susceptibilitat dels paramagnètics varia inversament amb la temperatura:

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (50)$$

On C és l'anomenada constant de Curie i T és la temperatura absoluta. L'expressió anterior es coneix com la llei de Curie.

La dependència amb la temperatura dels materials ferromagnètics es bastant més complexa. Però el seu comportament, per a temperatures superiors a una determinada temperatura característica del material, anomenada temperatura de Curie T_c de la que parlàvem també a l'apartat 4.5:

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_c} \quad (51)$$

Aquesta expressió es coneix com a llei de Curie-Weiss.

Per a temperatures per sobre de T_c , el material té un comportament típic dels materials paramagnètics, mentre que per a temperatures per sota de T_c , el material té un comportament ferromagnètic. Per aquesta raó hem d'entendre el paramagnetisme o el ferromagnetisme com un estat d'un material en unes condicions determinades i no com una característica intrínseca del material. La situació es anàloga a la dels estats líquid i sòlid de la matèria.

6.6 Energia magnètica

Si volem conèixer l'energia magnètica d'una distribució volúmica de corrents, \vec{j} , definida en un volum V , es pot descompondre aquesta distribució en tubs diferencials i considerar-los com a corrents filiformes. Així, l'energia magnètica del sistema és:

$$U_m = \frac{1}{2} \sum_{tubs} \phi dI \quad (52)$$

On $dI = Jds$ i ϕ és el flux a través de cadascun dels tubs:

$$\phi = \int_{ST} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint_{CT} \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (53)$$

Per tant:

$$U_m = \frac{1}{2} \sum_{tubs} \left(\oint_{CT} \vec{A} \cdot d\vec{l} \right) dI = \frac{1}{2} \sum_{tubs} \left(\int_{CT} \vec{B} \cdot d\vec{s} \right) dlds \quad (54)$$

D'on:

$$U_m = \frac{1}{2} \int_v \vec{A} \cdot \vec{J} dv \quad (55)$$

Mitjançant un càlcul una mica laboriós, aquesta expressió es pot transformar i es pot descriure en funció del camp magnètic.

$$U_m = \frac{1}{2} \int_{v \rightarrow \infty} \vec{B} \cdot \vec{H} dv \quad (56)$$

6.7 Camp magnètic al voltant d'un conductor

Per l'objectiu del projecte aquest és un dels punts més importants, aquest ens explicarà quines lleis són les que ens donen les expressions per poder calcular el camp magnètic que es produeix segons la intensitat que passi en el fil elèctric.

Sempre que hi ha un flux de corrent a través d'un conductor existeix un camp magnètic que l'envolta, i la direcció d'aquest camp depèn del sentit de la corrent elèctrica. Quan la corrent circula d'esquerra a dreta, el sentit del camp magnètic es contrari a les agulles del rellotge. Si el sentit del flux de corrent s'inverteix, el sentit del camp magnètic també s'inverteix. Aquest fet el es pot veure reflectit a la figura 17.

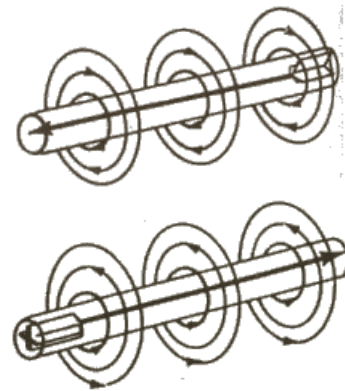


Figura. 17 Camp magnètic en un fil conductor

Si es fes un tall transversal del conductor i poguéssim observar el camp magnètic que el rodeja des de aquesta perspectiva, es veuria la forma que adopta el camp magnètic per tot el fil conductor. A la figura 18 el cercle central és el conductor i els cercles amb fletxes indiquen el sentit de les línies de força. Quan veien un punt central vol dir que la intensitat diguem que "surts" del paper, i quan es veu una "X" central vol dir que la intensitat "entra" cap al paper.

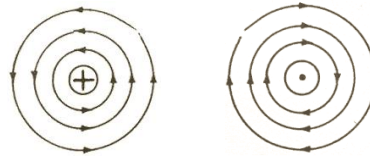


Figura. 18 Vista transversal camp magnètic



Figura. 19 Acoblament magnètic

El camp magnètic que es produeix en conductors paral·lels produeixen atraccions o repulsions depenent de la direcció en la que flueixi la corrent a cada conductor. A la figura 19 s'aprecia l'efecte de dos corrents paral·lels que flueixen en la mateixa direcció.

6.7.1 Llei de Biot-Savart

Els científics francesos Jean-Baptiste Biot i Felix Savart varen descobrir la relació entre una corrent i el camp magnètic que aquesta produeix. Cosa que també es pot portar a terme amb la llei d'Ampère, la aplicació depèn de la simetria en el sistema de corrents. Quan parlem d'electrostàtica es presenta una situació anàloga per calcular el camp elèctric, quan hi ha simetria en una distribució de càrrega, utilitzem la "Llei de Gauss", però quan no la hi ha, es pot calcular el camp elèctric amb la "Llei de Coulomb".

En el cas de les corrents que circulen per circuits filiformes (o tancats), la contribució d'un element infinitesimal de longitud $d\vec{l}$ del circuit recorregut per una corrent I crea una contribució elemental de camp magnètic, $d\vec{B}$, en el punt situat a la posició que apunta el vector \vec{r} a una distància r respecte de $d\vec{l}$, qui apunta a la direcció de corrent I . A la figura 20 es veu un exemple gràfic, per millorar la comprensió de l'expressió (57).

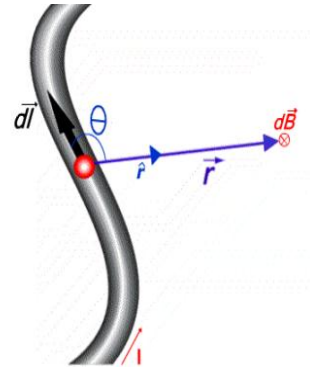


Figura. 20 Exemple gràfic Llei Biot-Savart

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (57)$$

On r és la distància de l'element de corrent al punt P on es desitja calcular el camp magnètic \vec{B} , \hat{r} és el vector unitari. El sentit de $d\vec{B}$ ve donat pel producte vectorial $d\vec{l} \times \hat{r}$.

Saben això es pot dir directament que:

$$\vec{B} = \int d\vec{B} \quad (58)$$

6.7.2 Llei d'Ampère

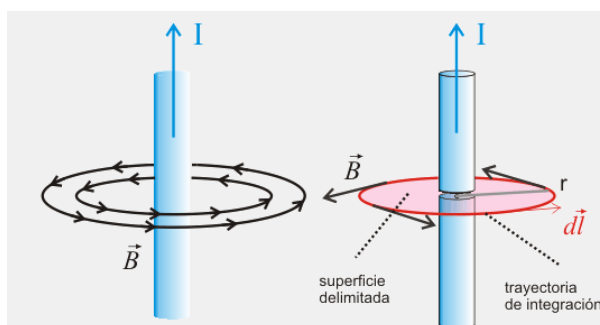
La llei d'Ampère permet calcular camps magnètics a partir de les corrents elèctriques. Va ser descoberta per André-Marie Ampère al 1826 i anuncia:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_T \quad (59)$$

La integral del primer membre és la circulació o integral de línia del camp magnètic per tot el llarg d'una trajectòria tancada. On $d\vec{l}$ és un vector tangent a la trajectòria triada en cada punt i on I_T és la corrent neta que travessa la superfície delimitada per la trajectòria.

6.8 Exemple de càlcul del camp magnètic

En aquest apartat mostrarem un exemple de com calcular el camp magnètic produït per un fil infinit.



Com aplicació de la llei d'Ampère, contemplem un fil que hi circula una corrent I a una distància r del mateix. Les línies del camp magnètic tindran el sentit donat per la regla de la ma dreta, per l'expressió general del camp creat per una corrent, per el que les seves línies seran circumferències centrades en el fil, com es veu a la figura 21.

Figura. 21 Exemple conductor infinit

Si partim de l'expressió (57):

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I \rightarrow \oint B dl = B \oint dl = B 2\pi r = \mu_0 I \quad (60)$$

Així obtenim:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I \quad (61)$$

6.9 Equacions de Maxwell

Per finalitzar l'apartat de magnetisme presentarem les equacions essencials que descriuen tots els fenòmens electromagnètics en medis en repòs respecte al sistema de coordenades emprat. Són vàlides per a situacions generals de variacions temporals en presència de materials qualssevol.

Aquestes són les equacions en forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (62)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (63)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (64)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (65)$$

BLOC II:

Simulacions, càlculs i proves pràctiques

Capítol 7:

Caracterització de l'altaveu

Per posar a prova els diferents objectes piezoelèctrics es necessita un "Shaker" o sacsejador. Aquest pot emular les condicions que facin moure un element per fer-lo ressonar. Així es pot comprovar quina potència ens pot donar segons la freqüència a la que oscil·li el Shaker. A la figura 22 un exemple de model de Shaker.

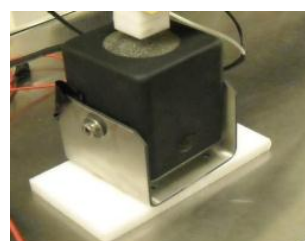


Figura. 22 Shaker

Ja que durant el projecte no s'ha pogut disposar d'aquesta eina, s'ha hagut de idear una eina que ens fes la mateixa utilitat. S'ha pensat en fer servir un petit altaveu de 3 polsades. Si es connecta aquest altaveu a un generador d'ona que doni una ona sinusoidal, es podran simular diferents vibracions a diferents tensions i freqüències.

L'inconvenient de fer servir un altaveu és que la seva resposta enfront la freqüència no és lineal. Això vol dir que a mesura que augmentem la freqüència de funcionament de l'altaveu presentarà un pic o varis pics de ressonància.

Per posar un exemple, imaginem que l'altaveu està funcionant a 50 Hz amb una senyal sinusoidal de 10 Vpp. L'altaveu presenta un moviment oscil·latori "amunt" i "avall". En aquestes condicions tenim una acceleració de 1 g. Ara bé si treballem en les mateixes condicions que en el cas anterior però només variem la freqüència i la posem a 20 Hz, en aquest cas l'acceleració que presentarà serà de 5 g.

Per tant als 20 Hz tenim una ressonància, ara imaginem que el dispositiu piezoelèctric amb el que volem treballar també presenta una ressonància als 20 Hz. Aquestes ressonàncies s'acoblaran l'una amb l'altre i no ens donaran resultats reals.

El que es vol fer en aquest apartat és linealitzar aquesta resposta, fent que a totes les freqüències l'altaveu presenti la mateixa acceleració.

7.1 Prova d'acceleració

En aquest apartat es muntarà un acceleròmetre a la part central de l'altaveu per veure quina acceleració presenta a cada freqüència. El circuit que es necessita per mesurar l'acceleració és el que s'observa a la figura 23. Les condicions amb les que es treballarà per comprovar l'acceleració seran les que es pot veure a la taula 1, com es pot veure no farem servir el condensador Cx, no cal aquest condensador, en canvi el Cdc si el es necessita perquè actuï com de filtre.

Paràmetre	Valor	Unitats
Vs (Tensió alimentació)	5	V
Cdc	10	nF
Cx	-----	F

Taula. 1 Condicions test

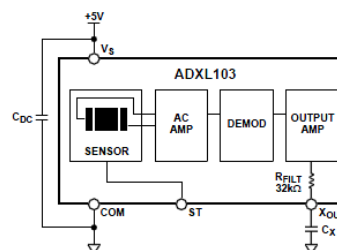


Figura. 23 Configuració de l'acceleròmetre

Per fer-nos una idea de com és la prova que s'ha realitzat, es pot apreciar una imatge a la figura 24.



Figura. 24 Muntatge Accelerometre

7.2 Anàlisis dels resultats

Un cop s'ha fet un escombrat en freqüències des de 0 fins a 100 Hz (rang de freqüències en el que s'està treballant). Si s'observa la figura 25 l'altaveu presenta un pic de ressonància entre els 25 i 28 Hz depenent de l'alimentació. El que ens està dient aquesta gràfica, és que, per exemple amb una alimentació de 10 V i una freqüència de 28 Hz tenim una acceleració de 5,7 g entre el punt positiu de l'altaveu i el punt negatiu de l'altaveu, perquè ho entenguem millor observem la figura 26. El que realment es pot extreure d'aquesta gràfica, és que, amb les condicions que s'està fent el test, es pot representar cada volt per un g d'acceleració (1 V/g).

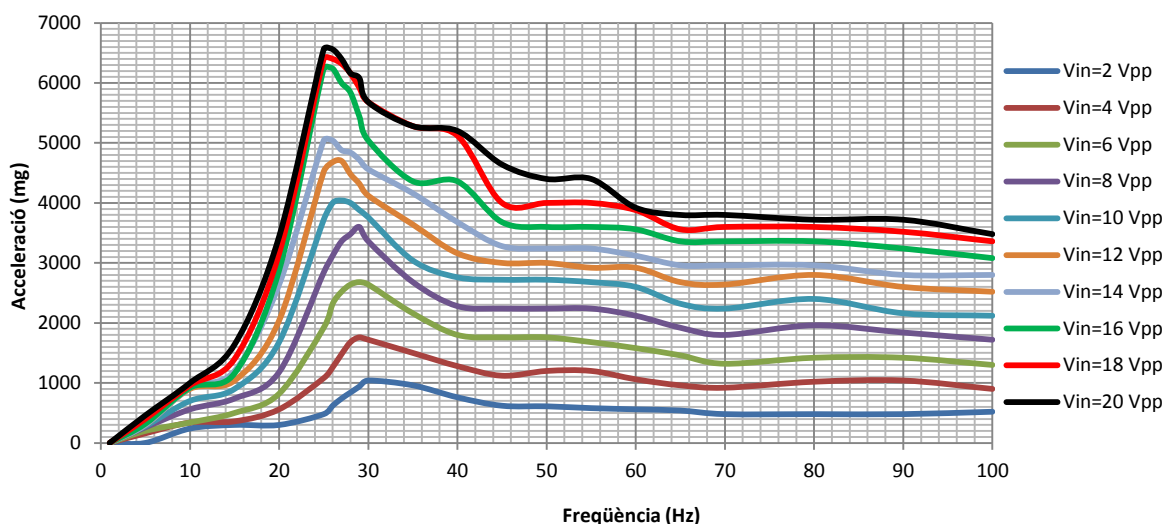


Figura. 25 Gràfica de comportament de l'altaveu

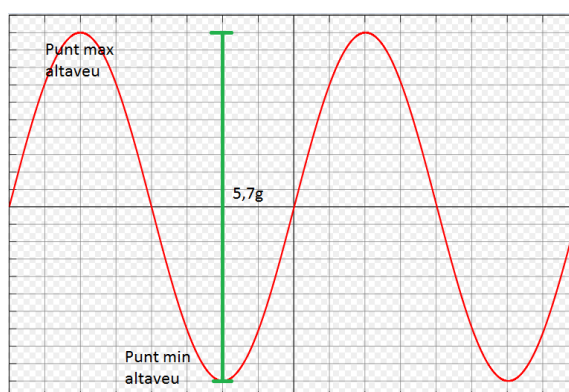


Figura. 26 Exemple de dades que ens dona l'acceleròmetre

Un cop es sap aquesta informació ara es podrà generar un programa amb el Matlab perquè per cada freqüència que li posem a l'altaveu tingui una mateixa acceleració. Les dades que farem servir són les que es pot veure a la taula 2, els valors indiquen el valor de Vpp que s'ha d'utilitzar.

Acceleració en g/Freq(Hz)	10 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
1g	20	7	2	3	3	4	4	4	4	4
2g	0	12	5	7	7	8	9	8	9	10
3g	0	18	7	12	12	12	14	14	15	16
4g	0	0	12	15	18	20	0	0	0	0

Taula. 2 Equivalències de l'altaveu

Per exemple, si es vol una resposta aproximadament lineal enfront les freqüències, s'haurà d'atorgar a cada freqüència un valor de tensió d'entrada corresponent al de la taula. A la figura 27 es té una gràfica de com seria la resposta lineal d'aquesta adaptació. Com es veu no és exactament lineal, però s'aproxima bastant i fa que l'altaveu no presenti una freqüència de ressonància. El marge d'error que pot donar aquesta linealització és de com a màxim $\pm 0,16$ g. Les freqüències que tenen un valor nul com per exemple 10 Hz amb 3 g, volen dir que no presenten cap equivalència per representar aquella acceleració, per tant el seu ample de banda, és menor.

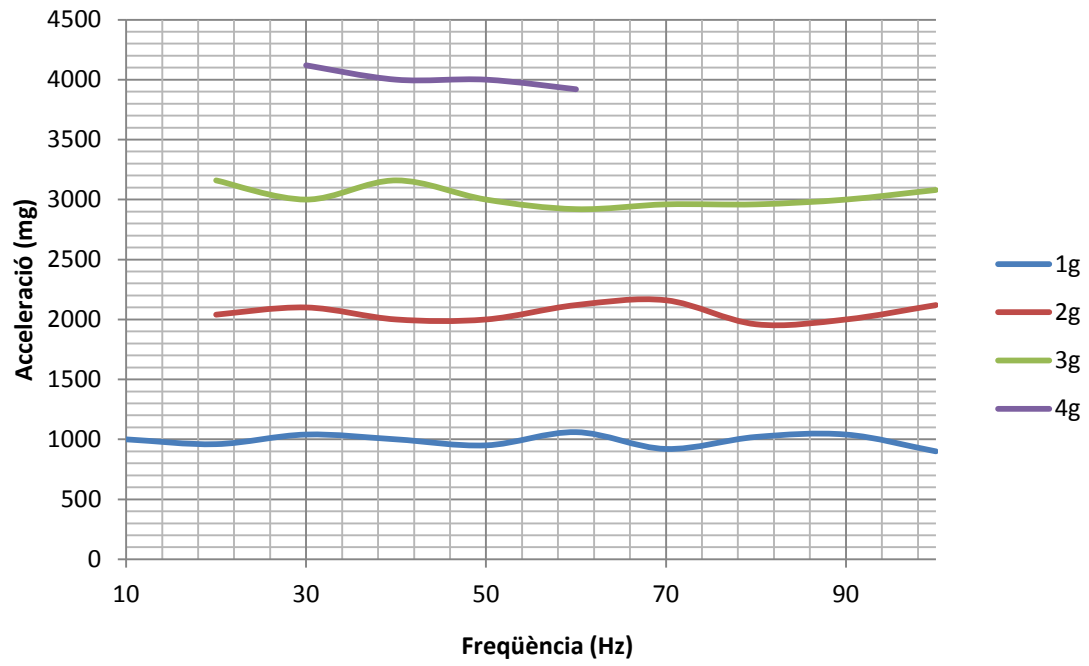


Figura. 27 Representació gràfica de la linealització

Capítol 8:

Càlculs dels elements piezoelèctrics

En aquest apartat es realitzaran els càlculs necessaris que s'han de seguir, per saber la freqüència de ressonància dels elements piezoelèctrics que disposem. Si es dona el cas que algun d'ells presenta una freqüència de ressonància superior a la que volem fixar, es podrà calcular quina és la massa necessària perquè funcioni a tal freqüència.

8.1 Càlculs de "Minisense 100 Vibration Sensor" amb massa

Abans de calcular la freqüència de ressonància s'ha de saber quina és la seva constant d'elasticitat, per saber-la hem d'aplicar l'expressió (12):

$$k = \frac{E}{4} W \frac{t^3}{L^3} = \frac{3 \text{ GPa}}{4} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \frac{(0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3}{(12 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3} = 166,66 \text{ N/m}$$

On:

E és el Mòdul de Young

W és l'ample

L és la longitud

t és el gruix

Un cop es coneix la constant d'elasticitat, es pot calcular la freqüència de ressonància, per trobar-la s'aplica l'expressió(13).

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{mass}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{166,66 \text{ N/m}}{(0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Kg})}} = 72,64 \text{ Hz}$$

On:

k és la constant d'elasticitat

mass és la massa aplicada a l'extrem del cantilever piezoelèctric.

A la figura 28 es veu la gràfica que dona el datasheet del Minisense 100. El datasheet d'aquest producte ens diu que la seva freqüència de ressonància es situa als 75 Hz, resultat molt semblant al que hem obtingut nosaltres.

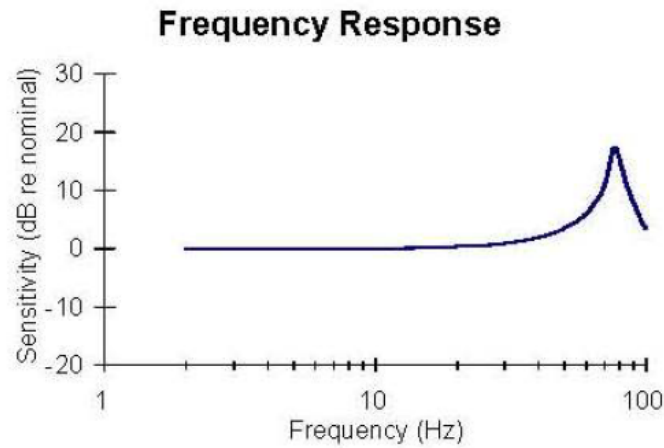


Figura. 28 Gràfica de ressonància del datasheet del Minisense 100

8.1.1 Massa per 50 Hz

Ara que ja se sap la freqüència de ressonància i que aquesta té un valor superior a 50 Hz, es pot calcular la massa necessària per ajustar una nova freqüència de ressonància. Per trobar-la s'aïlla de l'expressió (13).

$$m = \frac{k}{(2\pi \cdot f_{res})^2} = \frac{166,66 \text{ N/m}}{(2\pi \cdot 50 \text{ Hz})^2} = 1,688 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} = 1,68 \text{ g}$$

Si es té en compte que el component piezoelèctric ja porta 0,8 grams de massa, haurem de trobar una massa que sigui de 8,88 grams aproximadament.

8.2 Càlcul de "LDT1-028K Piezo film sensor" amb massa

En aquest cas com en l'anterior també haurem de trobar la constant d'elasticitat.

$$k = \frac{E}{4} \frac{t^3}{L^3} = \frac{3 \text{ GPa}}{4} \cdot 13 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \frac{(0,04 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3}{(25 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3} = 39,93 \text{ N/m}$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{39,93 \text{ N/m}}{(0,75 \cdot 10^{-3} \text{ Kg})}} = 36,72 \text{ Hz}$$

Com es pot veure aquest piezoelèctric no el podem fer servir, la seva freqüència de ressonància està per sota de la que nosaltres desitgem fixar. Si la freqüència de ressonància està per sobre de la que es desitja se li pot afegir massa per disminuir-la, però per el contrari no es pot.

8.3 Càlcul de "LDT1-028K Piezo film sensor" sense massa

Com en els dos casos anteriors i com en els següents seran els mateixos.

$$k = \frac{E}{4} W \frac{t^3}{L^3} = \frac{3 \text{ GPa}}{4} \cdot 13 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \frac{(0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3}{(25 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3} = 39,93 \text{ N/m}$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{39,93 \text{ N/m}}{(0,03 \cdot 10^{-3} \text{ Kg})}} = 183,61 \text{ Hz}$$

El datasheet ens diu que la seva freqüència de ressonància es troba entre els 180Hz aproximadament. En aquest cas seria un candidat a possible piezoelèctric que es pot fer servir, però com veurem a l'apartat 8.3.1 no serà possible.

8.3.1 Massa per 50 Hz

$$m = \frac{39,93 \text{ N/m}}{(2\pi \cdot 50 \text{ Hz})^2} = 0,404 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} = 0,404 \text{ g}$$

Si volem que tingui la freqüència de ressonància als 50 Hz haurem de posar un imant de 0,4 grams. Aconseguir un imant amb unes característiques com aquestes pot ser difícil, a part de que tindrà unes mesures molt petites. Gairebé es pot descartar aquest piezo.

8.4 Càlcul de V21B

Els piezoelèctric que hem fet els càlculs fins ara han sigut de tipus piezofilm que són d'un material anomenat PVDF (Polyvinylidene fluoride). Els dos models que veurem als apartats 8.4 i 8.5 tenen un recobriments de FR-4, el qual presenta un Mòdul de Young molt més elevat que en els anteriors cassos, cosa que fa que sigui molt menys flexible. De totes maneres farem els càlculs per tindre altres possibilitats per el model final.

8.4.1 massa de 2 grams

Primer com en els altres casos hem de conèixer la constant d'elasticitat del piezo.

$$k = \frac{E}{4} W \frac{t^3}{L^3} = \frac{46 \text{ GPa}}{4} \cdot 14,58 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \frac{(0,7874 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3}{(35,56 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3} = 1807,87 \text{ N/m}$$

Ara ja es pot passar a calcular la freqüència ressonància amb una massa de 2 grams.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1807,87 \text{ N/m}}{(2 \cdot 10^{-3} \text{ Kg})}} = 151,31 \text{ Hz}$$

8.4.2 massa de 3 grams

Degut a que el datasheet ens ofereix unes gràfiques on ens proporciona la relació entre massa i freqüència, emularem la mateixa gràfica per així poder-la comparar. Directament calcularem les freqüències de ressonància, la constant d'elasticitat és la mateixa per tots els casos.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1758,57 \text{ N/m}}{(3 \cdot 10^{-3} \text{ Kg})}} = 123,55 \text{ Hz}$$

8.4.3 massa per 50 Hz

Un cop ja hem realitzat diferents càlculs per diferents masses, ara anem a calcular quina massa necessitem per una ressonància de 50Hz

$$m = \frac{1807,87 \text{ N/m}}{(2\pi * 50 \text{ Hz})^2} = 18,31 \text{ g}$$

Tal i com es pot veure haurem de col·locar 18,31 grams a la punta del cantilever per trobar 50 Hz de ressonància.

8.4.4 comparació entre datasheet i càlculs

A la figura 29 es veu la gràfica que ens proporciona el datasheet del model V21B del comportament entre la massa que se l'hi aplica i la freqüència a la que és troba.

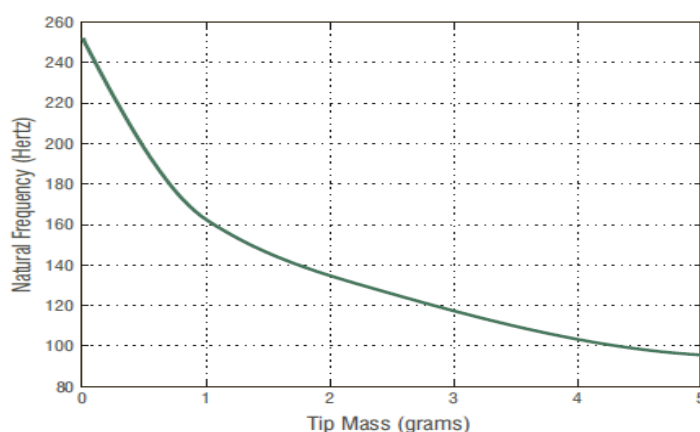


Figura. 29 Gràfica del datasheet del V21B

A la figura 30 es pot veure la mateixa gràfica però amb els resultats que hem obtingut amb els càlculs. Per completar la gràfica s'han realitzat els mateixos càlculs dels apartats anteriors, però no els hem mostrat. Com es pot veure la zona que coincideix amb les dos gràfiques és molt semblant.

Per exemple si mirem a la nostra gràfica quan apliquem 3 grams ens surt una freqüència de 123,55 Hz. A la gràfica que ens proporcionen amb una massa de 3 grams tenim una ressonància als 118 Hz aproximadament. Tot i que difereixen una mica són resultats molt semblants, quanta més massa col·loquem més pròxims seran els dos resultats. Per el contrari quanta menys massa hi hagi més diferiran l'un de l'altre, això pot ser degut a petites diferències de decimals al fer els càlculs.

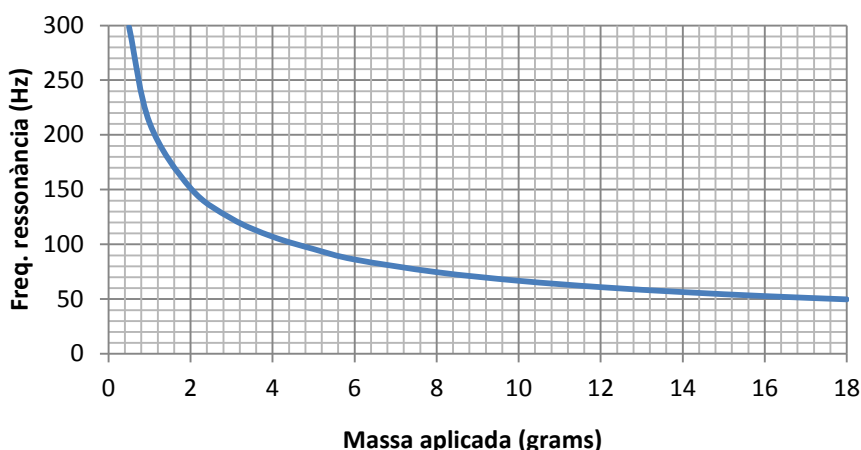


Figura. 30 Gràfica del V21B obtinguda amb els càlculs

8.5 Càlcul de V25W

En aquest apartat farem els mateixos càlculs que en l'apartat 8.4 i també farem una gràfica comparativa entre el datasheet i els nostres resultats.

8.5.1 massa de 2 grams

$$k = \frac{E}{4} W \frac{t^3}{L^3} = \frac{46 \text{ GPa}}{4} \cdot 33,274 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \frac{(0,6096 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3}{(45,974 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3} = 892,07 \text{ N/m}$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1758,57 \text{ N/m}}{(2 \cdot 10^{-3} \text{ Kg})}} = 106,29 \text{ Hz}$$

8.5.2 massa de 6 grams

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{892,07 \text{ N/m}}{(6 \cdot 10^{-3} \text{ Kgr})}} = 61,36 \text{ Hz}$$

8.5.3 massa per 50 Hz

Com ja hem vist en els altres apartats, calculem la massa necessària per una ressonància de 50Hz.

$$m = \frac{892,07 \text{ N/m}}{(2\pi * 50 \text{ Hz})^2} = 9,03g$$

8.5.4 comparació entre datasheet i càlculs

En aquesta primera figura 31 es pot veure el resultat que ens ofereix el datasheet del producte.

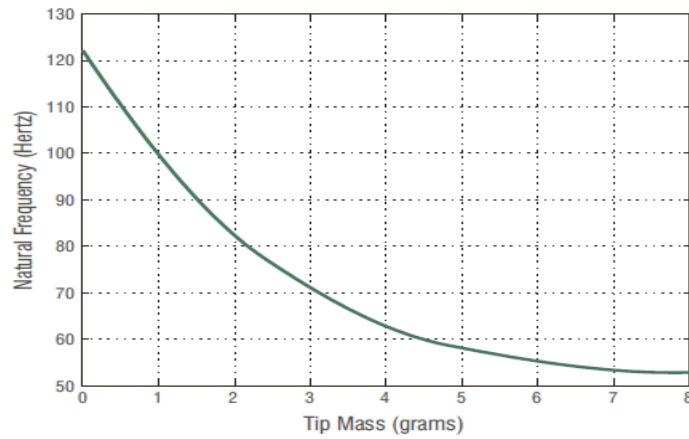


Figura. 31 Gràfica del datasheet del V25W

A la figura 32 es veu el resultat dels nostres càlculs, com en l'anterior apartat el càlculs cada cop són més iguals i per el contrari quanta menys massa més diferència hi ha, són degudes a petites diferències en els nostres càlculs i els del fabricant.

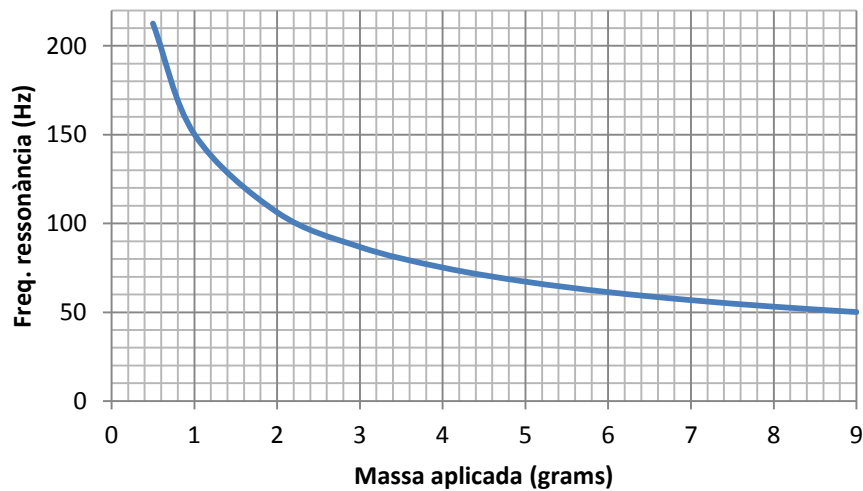


Figura. 32 Gràfica del V25W obtinguda amb els càlculs

Capítol 9:

Simulacions dels components piezoelèctrics

L'objectiu d'aquest apartat serà el de demostrar que amb diferents tipus de configuració piezoelèctriques, es poden obtenir resultats molt dispars depenent del tipus de material PZD o del material que l'envolta. Això es farà fent servir el programa informàtic Comsol, aquest farà que no s'hagi de tindre el material físicament per veure el seu comportament.

9.1 Introducció de què és Comsol

Comsol Multiphysics (abans conegut com *FEMLAB*) és un paquet de software d'anàlisis i resolució per elements finits per varies aplicacions físiques i de enginyeria, especialment fenòmens acoblats o multifísics. Comsol també ofereix un àmplia i ben gestionada *interface* amb *Matlab* i els seus *toolboxes* que proporcionen una àmplia varietat de possibilitats de programació, processat i post processat. També proporciona una *interface* similar a *Comsol Script*. Els paquets són multi plataforma (*Windows, Mac, Linux, Unix*). A part de les interfases d'usuari convencionals basades en la física, Comsol també permet entrar sistemes acoblats de equacions en derivades parcials.

9.2 Element que es simularà

Es farà la simulació de dos models de cantilever piezoelèctrics diferents. Un model només tindrà la làmina de material piezoelèctric que es denominarà Model 1, a la taula 3 surten les seves característiques. A la figura 33 es veu com serà físicament el Model 1. Amb les dades de la taula 3 es pot calcular la freqüència de ressonància, aquesta ens dona 54,34 Hz.

	Valor	Unitats
Ample	20	mm
Longitud	35	mm
Gruix	1	mm
Desplaçament	5	mm
Freqüència	50	Hz
Material Piezo.	PZT-2	
R. Càrrega	1000	Ω
Mòdul de Young	1	GPa
Constant d'elasticitat	116,61	N/m

Taula. 3 Característiques del Model 1

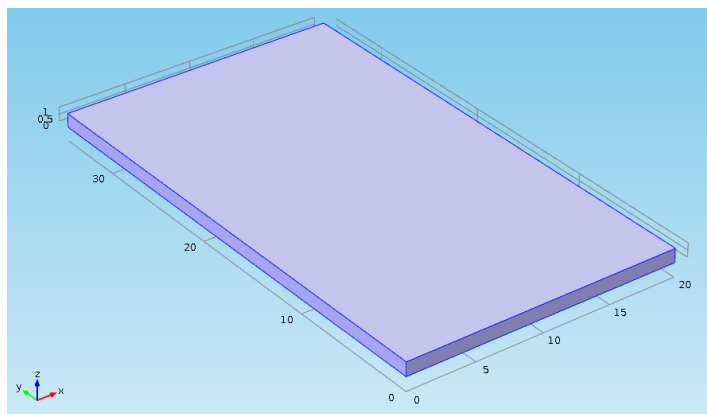


Figura. 33 Model 1

Aquest model està sotmès a un moviment periòdic, a una freqüència de 50 Hz i amb un moviment a l'eix Z de 10 mm. Un cop simulem veurem la tensió i intensitat que ens ofereix aquest model. A la figura 34 s'observa com el cantilever va prenent diferents tons de color, aquests colors reflecteixen la intensitat de moviment i de torsió al que està sotmès el material. La part més blava es la part que queda subjecte sobre una estructura, i la part vermella és la que va oscil·lant en l'eix Z de coordenades.

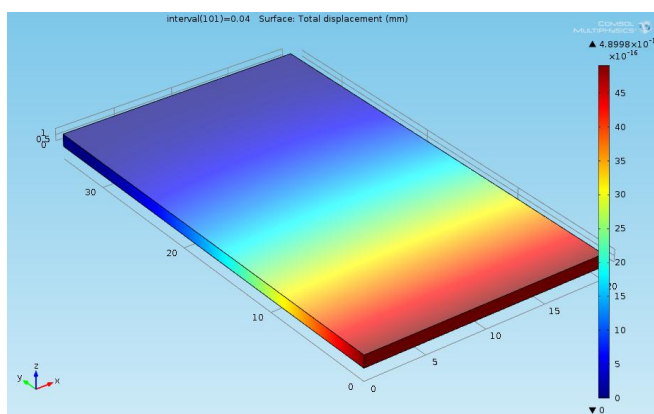


Figura. 34 Model 1 sota moviment oscil·lant

A la taula 4 hi ha les característiques més rellevants del Model 2 de cantilever piezoelèctric que hem dissenyat per veure quina potència ens extreu.

	Valor	Unitats
Ample	14.478	mm
Longitud	35.56	mm
Gruix Piezo	0.5	mm
Gruix Material 2	1.5	mm
Desplaçament	10	mm
Freqüència	50	Hz
Material Piezo.	PZT-2	
Material 2	FR4	
R. Càrrega	1000	Ω
Mòdul de Young	22	GPa
Constant d'elasticitat	221,35	N/m

Taula. 4 Característiques Model 2

Com es pot observar a la figura 35 es veuen tres capes diferents de material. La capa superior és una capa de 750 μm de material FR4. La capa central és la capa de material piezoelèctric, en aquest cas la capa és de 500 μm i del mateix tipus que el Model 1. Per últim la capa inferior també és de FR4. Com en l'anterior cas, amb les dades de la taula 4 es pot calcular la freqüència de ressonància del cantilever, aquesta és de 61,1 Hz.

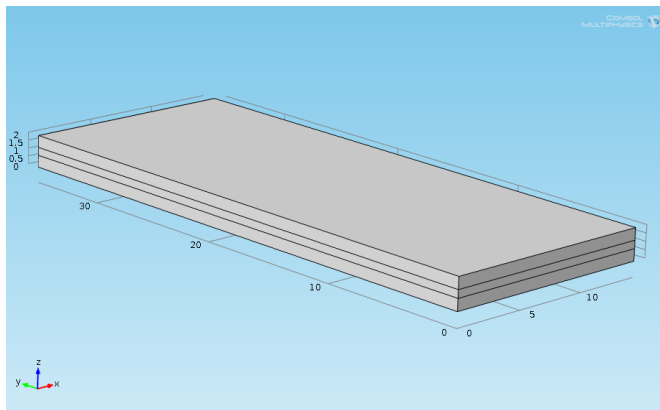


Figura. 35 Model 2

De la mateixa manera que en la figura 34 a la figura 36 també s'observa el comportament del piezo davant les forces a les que està sotmès.

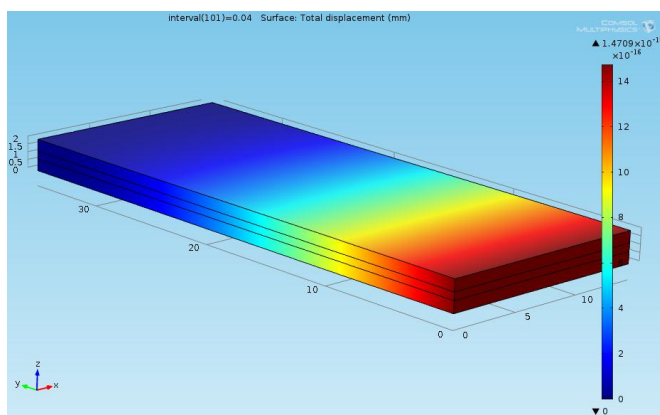


Figura. 36 Model 2 sota moviment oscil·lant

9.3 Resultats gràfics del moviment

En aquest apartat es veurà el moviment oscil·latori dels dos models de cantilever piezoelèctric.

9.3.1 Model 1

Com es mostra a la figura 37 tenim la seqüència completa d'imatges del Model 1, sotmès a un moviment de 5mm amb una freqüència de 50Hz. Es pot veure com a mesura que augmenta la distància des de l'extrem en moviment respecte la seva forma original, augmenta el rang de colors. Això vol dir que el piezo està sotmès a un estrès gran i fa així una diferència de potencial major.

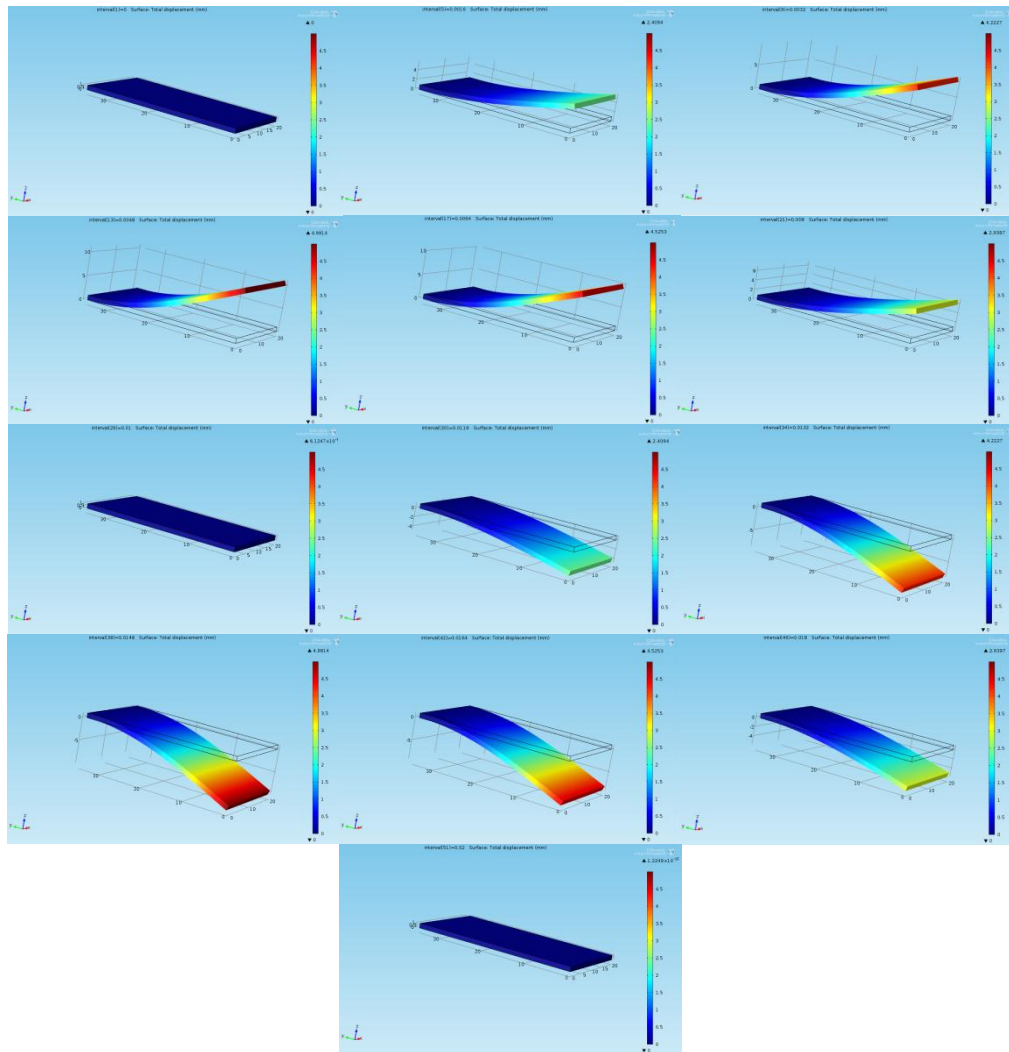


Figura. 37 Seqüència de moviment del cantilever

9.3.2 Model 2

De igual forma que en l'anterior cas a la figura 38 es veuran els punts més diferenciats de la seqüència de moviment del Model 2.

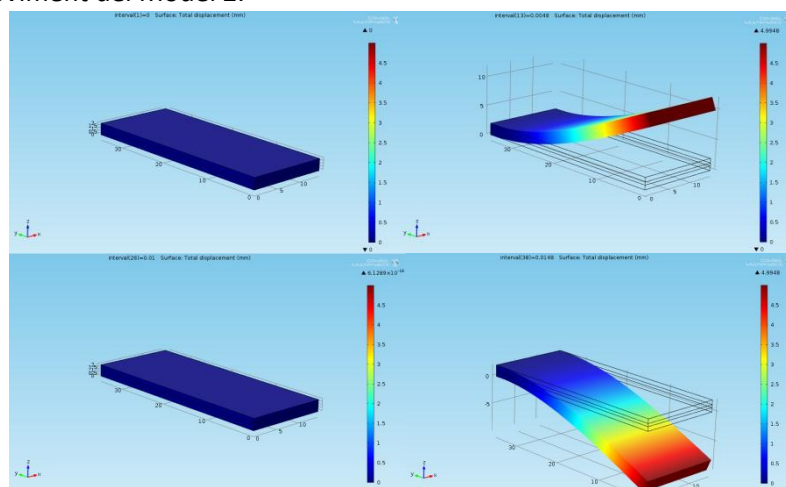


Figura. 38 Seqüència de moviment del Model 2

9.4 Resultats numèrics del moviment

9.4.1 Model 1

Dels molts tipus de dades que es pot extreure del Comsol, s'extreu la tensió i la intensitat que hi ha a la resistència de càrrega que col·loquem entre els terminals del cantilever.

A la figura 39 es veuen les dos gràfiques que s'han extret del Comsol. A l'esquerra la tensió i a la dreta la intensitat. El punt màxim de tensió és de ± 1.5 V i de intensitat 1.5 mA. Per tant automàticament es pot dir que la potència és de ± 2.25 mW.

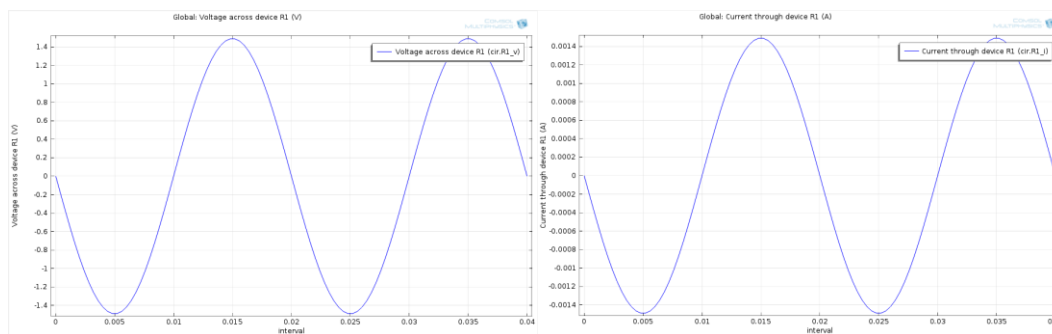


Figura. 39 Tensió i intensitat del Model 1

9.4.2 Model 2

El Model 2 com té menys material PZT s'obté menys tensió i intensitat. A la figura 40 s'observa que obtenim 150 mV i 120 μ A aconseguint una potència de 180 nW.

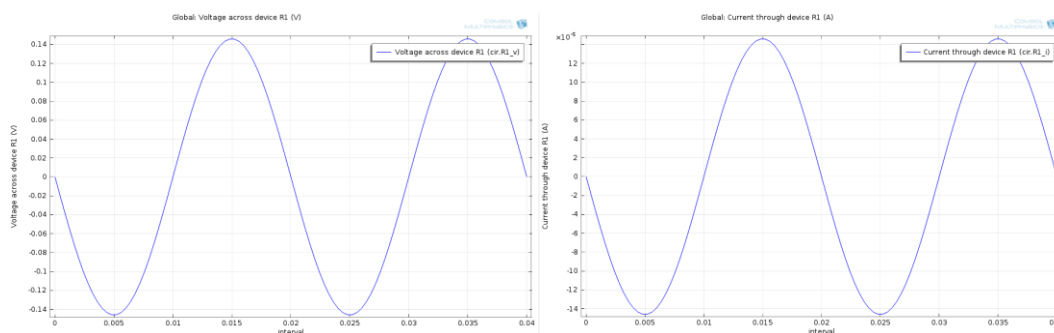
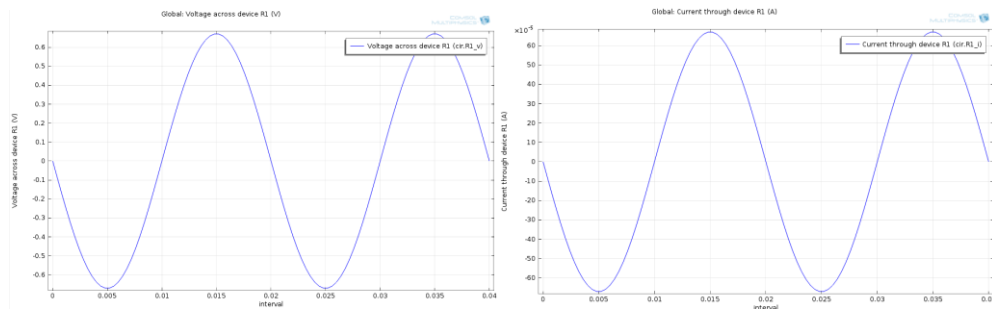


Figura. 40 Tensió i intensitat del Model 2

9.5 Prova amb un material diferent

En aquest apartat es farà una prova més, canviant el material piezoelèctric del Model 1. D'aquesta manera es podrà veure quin paper hi juga el tipus de material. A la figura 41 es veu el resultat de canviar el material de PZT-2 a PZT-5H. La potència que s'extreu en aquest cas és de $\pm 462,4$ μ A, un valor gairebé 5 vegades més petit. Amb això es vol dir que el tipus de material del piezoelèctric és summament important.

**Figura. 41 Tensió i intensitat amb PZT-5H**

9.6 Conclusions

Com s'ha pogut observar en aquest apartat, Comsol ofereix una infinitat de possibilitats per crear i reproduir moltíssims fenòmens físics. Comsol realment és una eina molt potent i difícil de fer servir i més de dominar. Amb això es vol dir que els coneixements que s'han obtingut per fer els models anteriors, només són una petita part del que realment es pot fer amb aquest programa.

La conclusió que es pot treure d'aquest apartat, és que, si es coneixen tots els paràmetres i característiques dels materials que es vulguin fer servir, no cal que es tinguin físicament sinó que es poden simular amb una alta fiabilitat. Es pot veure el comportament d'aquells materials a certes condicions.

Capítol 10:

Caracterització dels elements piezoelèctrics

En aquest capítol es fan varies proves dels models de dispositius piezoelèctrics dels que es disposen. L'objectiu d'aquest test, és comprovar que els càlculs que s'han realitzat al capítol 8 són semblants als de la realitat i segon, saber exactament quin és el millor, per seguir endavant amb el projecte.

10.1 Test de "Minisense 100 Vibration Sensor" amb massa

El primer a passar el test serà el Minisens, aquest donava una freqüència de ressonància de 72,64 Hz. A la figura 42 es pot veure el muntatge que s'ha fet, per realitzar el test experimental.



Figura. 42 Muntatge per fer el test

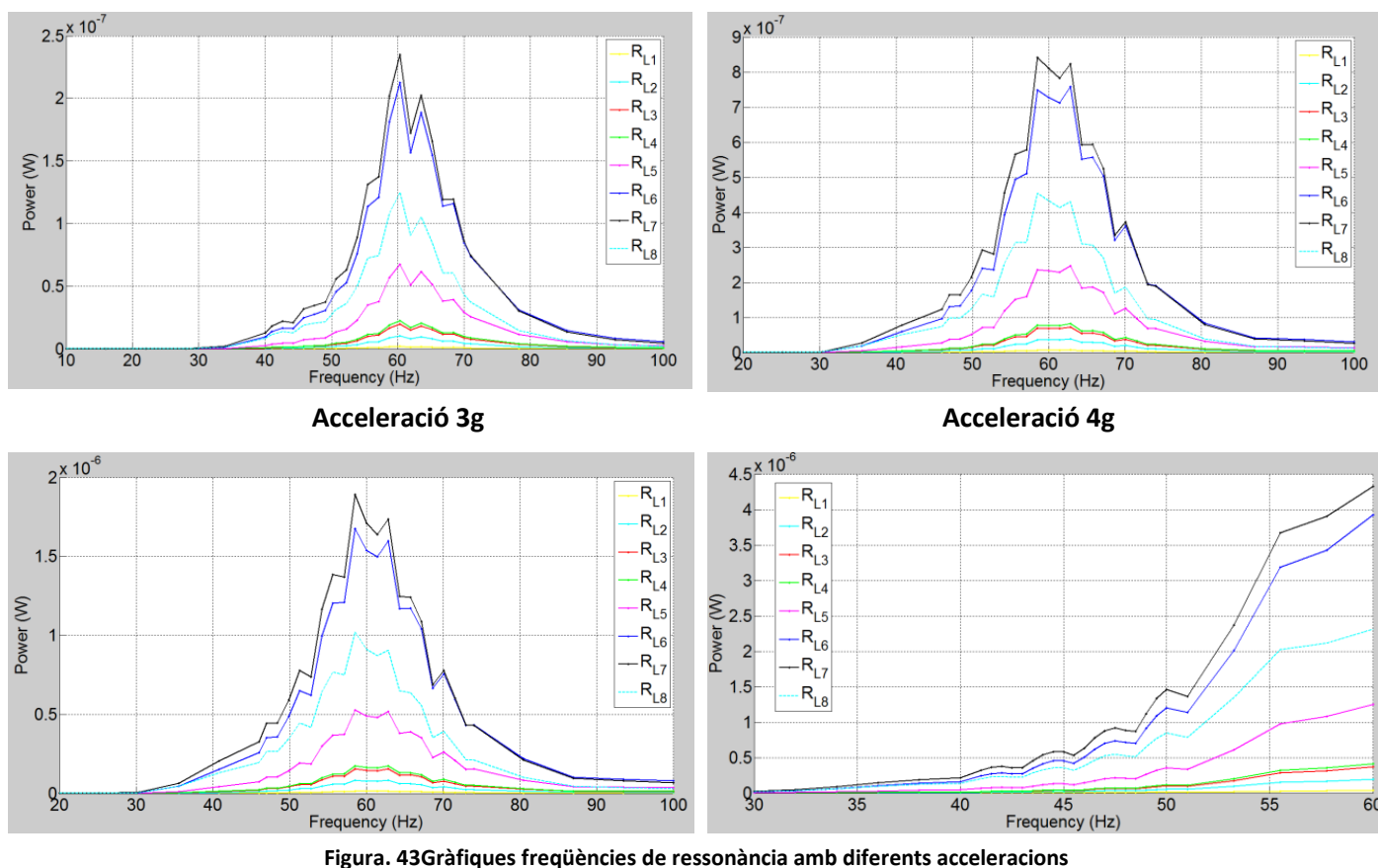
En aquest punt és on entra en joc la informació que s'havia extret al capítol 7. La taula 2 donava les equivalències de les tensions que s'havien de posar per aconseguir una acceleració aproximadament lineal. Aquesta informació s'ha fet servir al Matlab, on s'ha fet un programa que per cada freqüència fa una interpolació dels valors de la taula 2, per així aconseguir aquesta acceleració lineal.

10.1.1 Test freqüència ressonància

En aquest punt es veurà la potència que dona el Minisens per cada freqüència en un rang de 10 a 100 Hz. En el cas de 4 g d'acceleració, al no poder fer una equivalència per totes les freqüències té un ample de banda de 30 Hz. Si s'observa la figura 43 es poden veure els resultats del test.

Acceleració 1g

Acceleració 2g



Tot i que a les figures no es pot dir un pic exacte de ressonància, perquè segons l'acceleració varia una mica, sí que es pot situar sobre els 58-64 Hz aproximadament. Un resultat semblant al que vam obtenir teòricament. A la taula 5 es pot veure la potència que dona a una freqüència de 60 Hz, per les diferents acceleracions.

Acceleració	Potència (W)
1	2.44E-07
2	8.20E-07
3	1.90E-06
4	4.45E-06

Taula. 5 Potència a 60Hz

10.1.2 Test escombrat impedàncies

La segona prova al que es sotmetrà al Minisense serà un escombrat de impedàncies. Això vol dir que es veurà quina és la impedància òptima que caldria posar al Minisense per treure la potència òptima. Tot i que per el projecte no es pot fer aquesta adaptació d'impedàncies, és una informació útil.

La informació del conjunt de gràfiques de la figura 44, s'extreu com, l'element piezoelèctric es posa a la seva freqüència de ressonància. Amb la tensió del punt màxim(en ressonància), es connecta entre els terminals de l'element posat a prova varies impedàncies de càrrega. Amb això es sap quina és la impedància amb la que ofereix millors resultats.

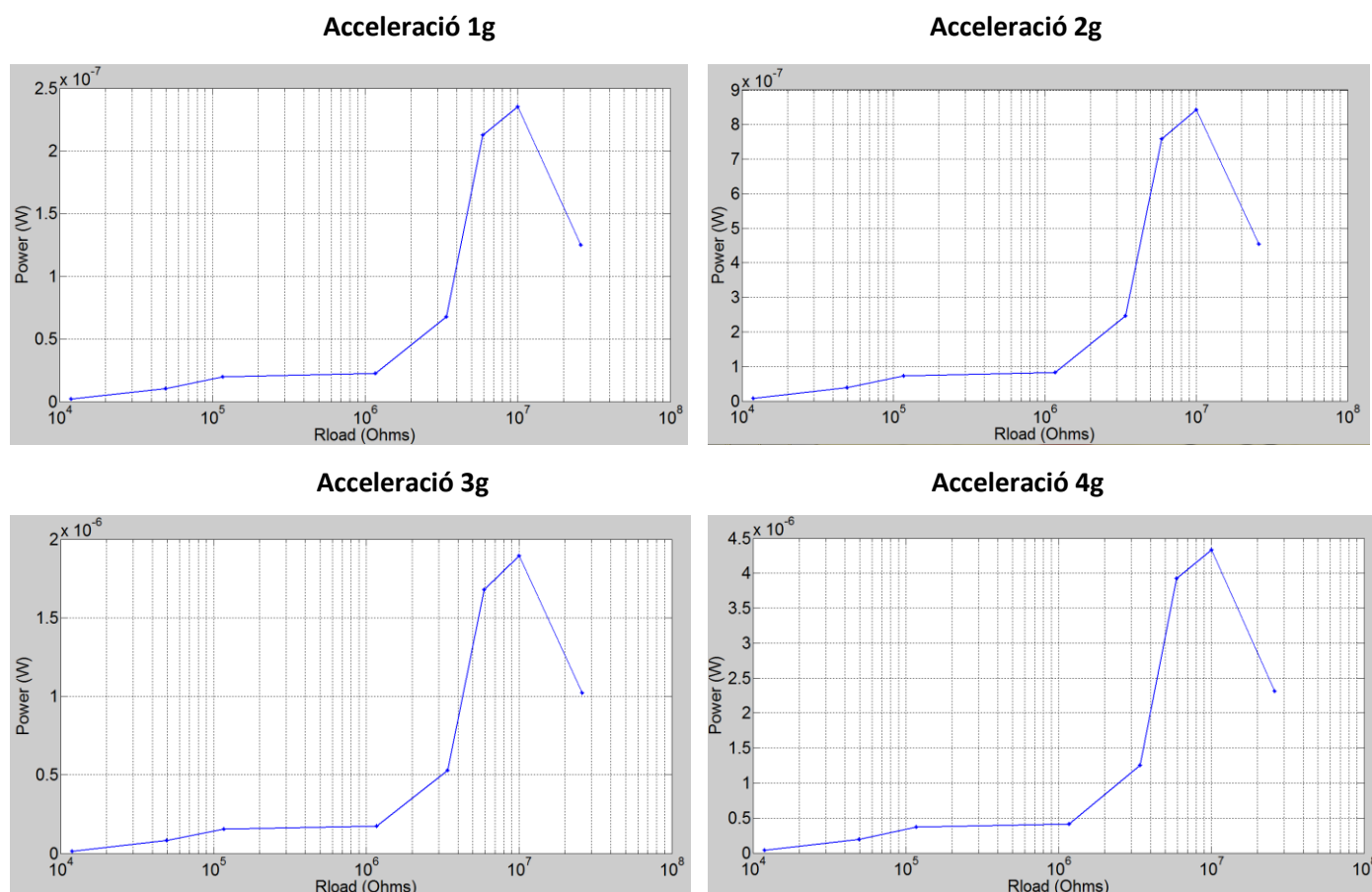


Figura. 44 Gràfiques escombrat impedàncies amb diferents acceleracions del Minisense

Com s'ha pogut comprovar a les gràfiques de la figura 44, totes les impedàncies òptimes tenen el mateix valor, en aquest cas 100 MΩ. A la taula 6 es pot veure les potències que s'extreu amb les diferents acceleracions.

Acceleració (g)	Potència (W)
1	2.44E-07
2	9.40E-07
3	1.90E-06
4	4.45E-06

Taula. 6 Potències extretes per acceleració

10.1.3 Gràfica de potència VS acceleració

La figura 45 dona la informació de la tendència que segueix el Minisens si li s'augmenta l'acceleració. Per fer aquesta taula s'ha fet servir una freqüència de 60 Hz i una resistència de càrrega de 10 MΩ. Com es veu la tendència és que, a més acceleració més potència.

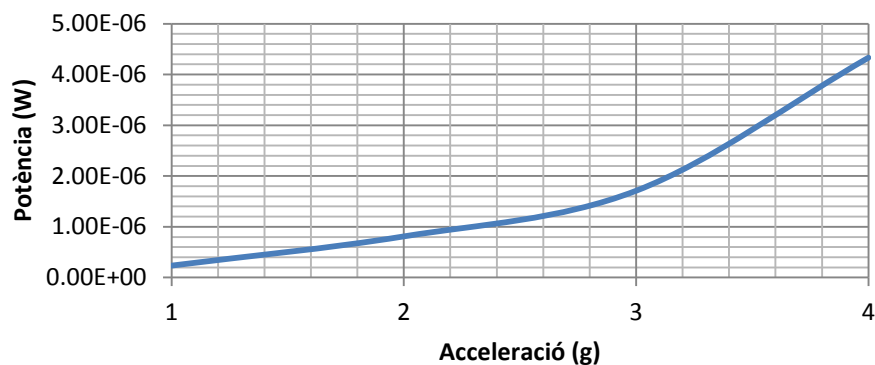


Figura. 45 Gràfica de Potència VS acceleració

10.2 Test de "LDT1-028K Piezo film sensor" amb massa

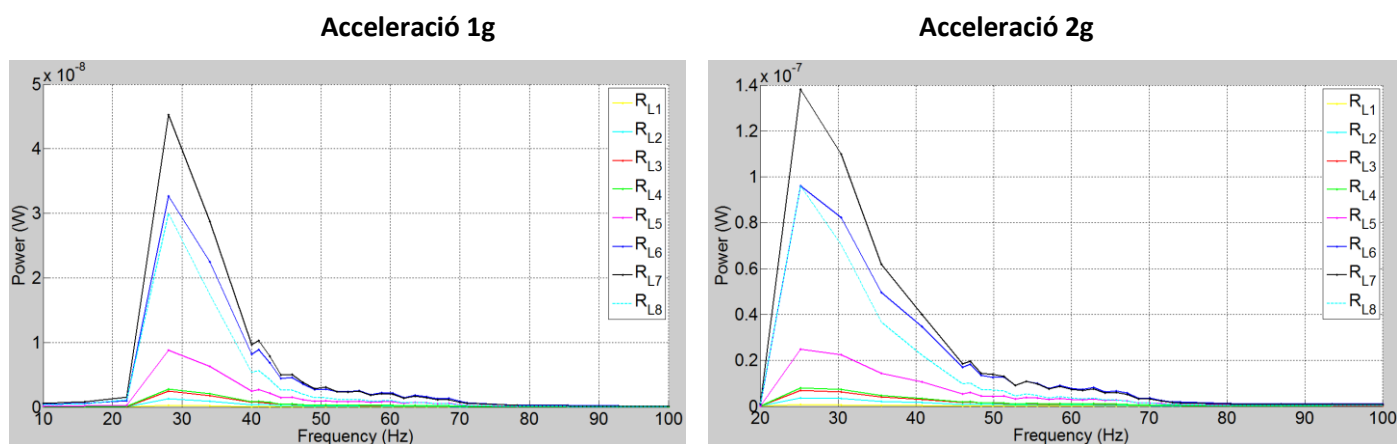
Ara es farà el test al Piezofilm sensor que es veu a la figura 46. El càlcul de la seva freqüència de ressonància és 36,72 Hz.



Figura. 46 LDT1-028K Piezofilm

10.2.1 Test freqüència ressonància

Com ja havíem vist al punt 10.1.1 a la figura 47 hi ha les gràfiques del comportament del piezofilm enfront un escombrat de freqüències.



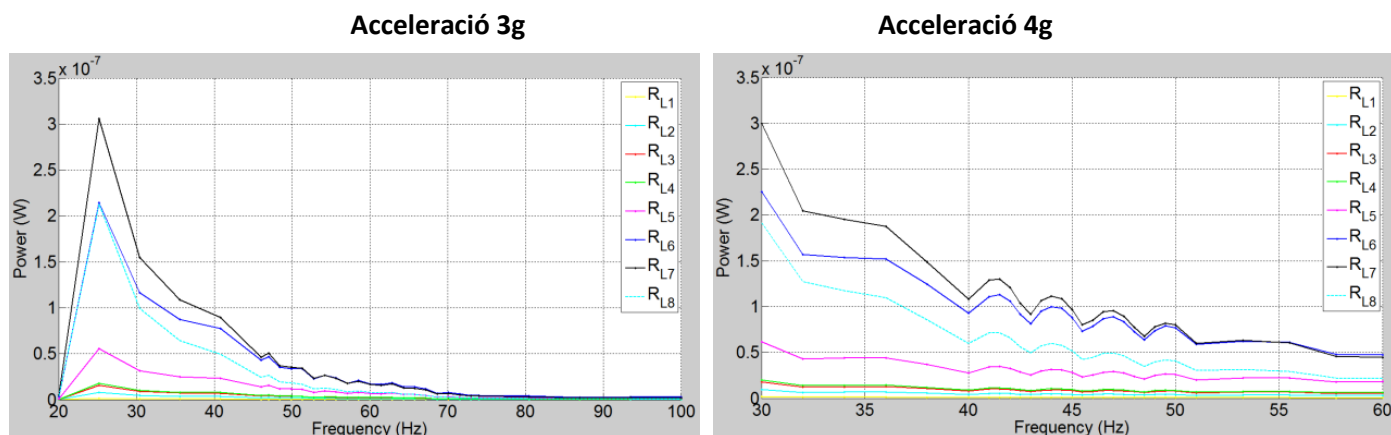


Figura. 47 Gràfiques freqüències de ressonància amb diferents acceleracions

La freqüència de ressonància que havíem calculat a l'apartat era de 36,72Hz i els resultats del test ens situen la freqüència entre els 25/28 Hz.

10.2.2 Test escombrat impedàncies

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 10.1.2 farem un test d'impedàncies per saber la impedància òptima.

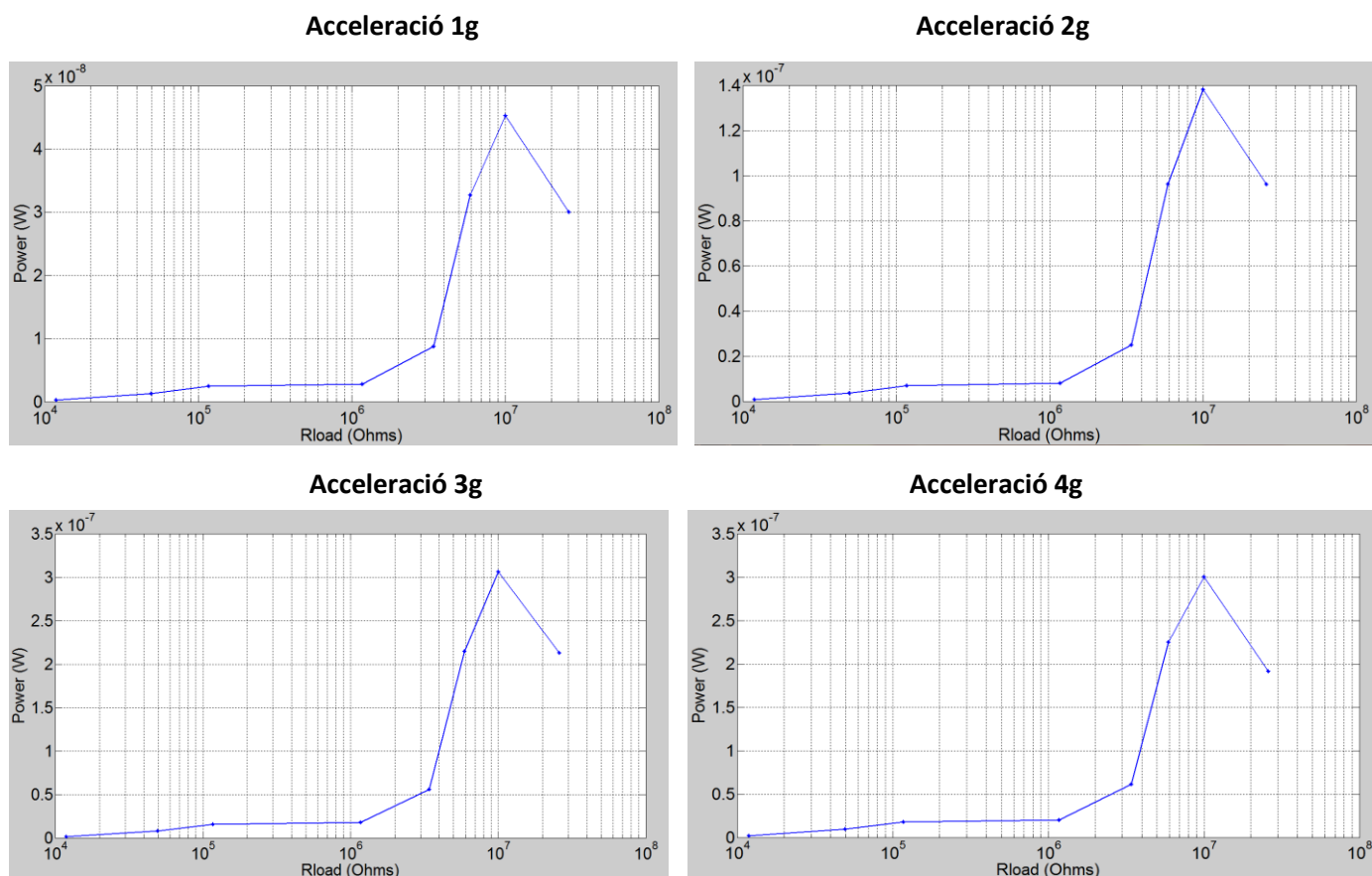


Figura. 48 Gràfiques escombrat impedàncies amb diferents acceleracions del Piezofilm amb massa

Com s'ha pogut veure a la figura 48, la impedància òptima es troba als 100MΩ com en l'anterior cas.

10.2.3 Gràfica de potència VS acceleració

La figura 49 dona la informació de la potència que atorga el dispositiu piezoelèctric segons a l'acceleració que estigui sotmès. Aquesta taula s'ha fet amb els resultats de la impedància òptima.

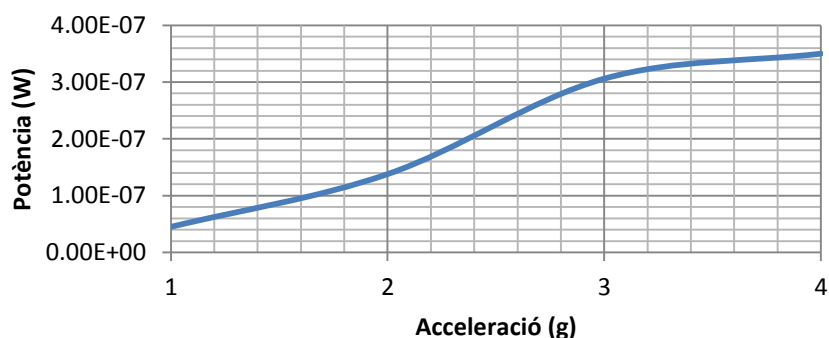


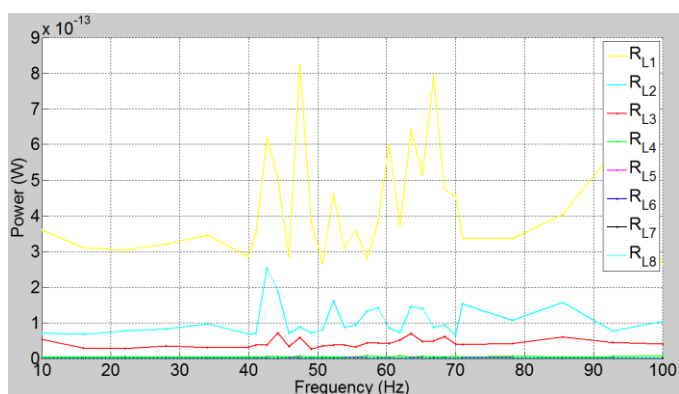
Figura. 49 Gràfica de Potència VS acceleració

10.3 Test de "LDT1-028K Piezo film sensor"

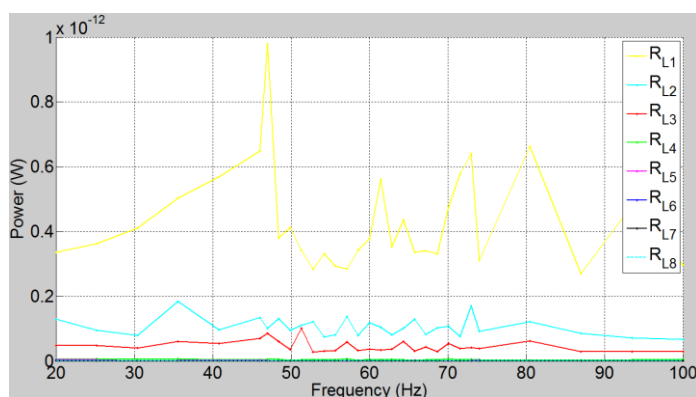
En aquest últim test es veurà el comportament del mateix dispositiu piezoelèctric que abans però aquest cop sense massa afegida. Els càlculs que s'han fet a l'apartat 8.3 dona 182 Hz. Els test que es faran seran els mateixos que per els anteriors apartats.

10.3.1 Test freqüència ressonància

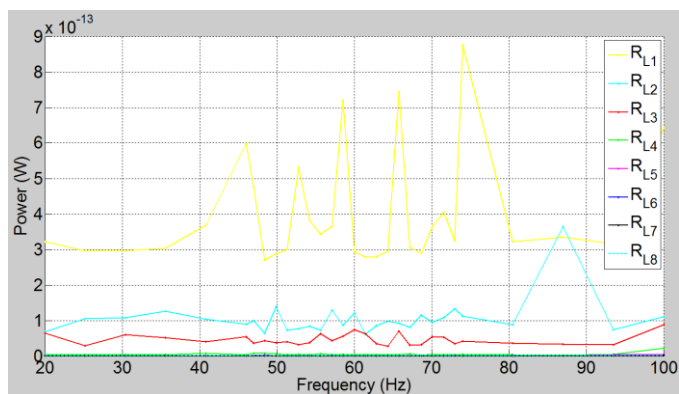
Acceleració 1g



Acceleració 2g



Acceleració 3g



Acceleració 4g

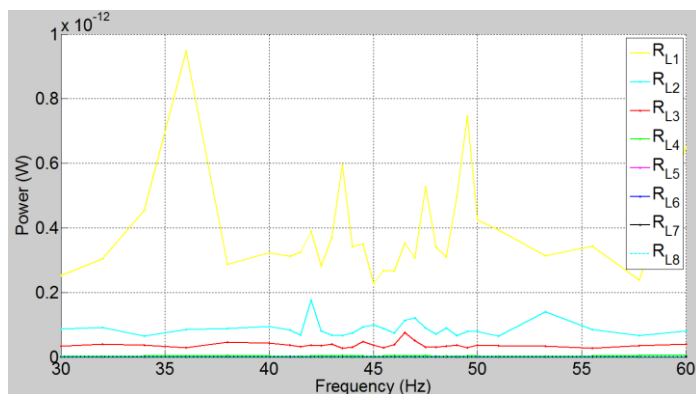


Figura. 50 Gràfiques freqüències de ressonància amb diferents acceleracions

Els resultats que es veuen a les gràfiques de la figura 50, donen potències pràcticament nul·les. Això és degut a que la freqüència de ressonància es troba a una freqüència més elevada. De totes maneres aquest entrega menys potència que el Minisense. Això fa pensar que el millor element piezoelèctric dels que disposem serà el Minisense, també té una mida menor i serà més fàcil d'integrar al prototip.

10.3.2 Test escombrat impedàncies

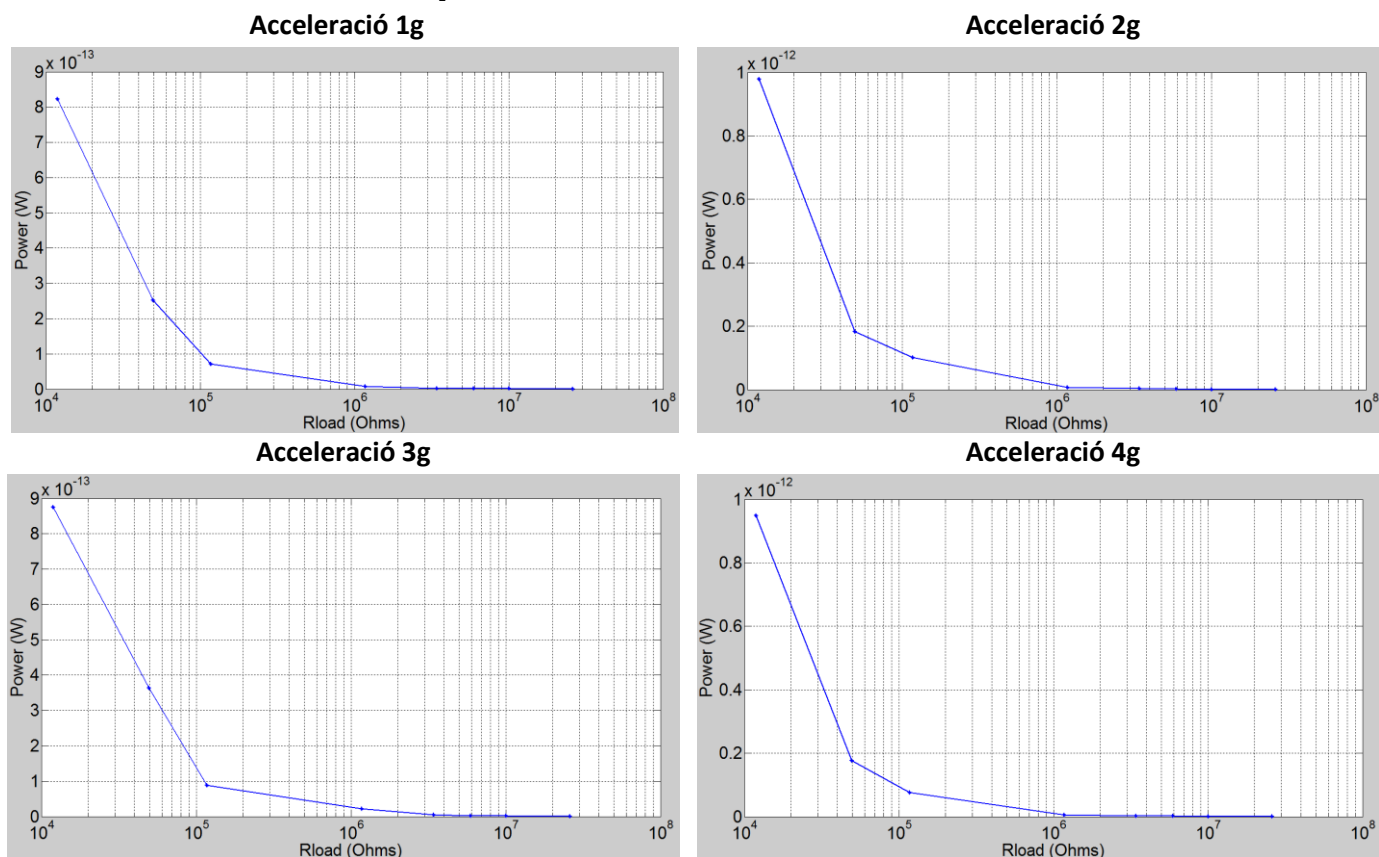


Figura. 51 Gràfiques escombrat impedàncies amb diferents acceleracions del Piezofilm sense massa

10.3.3 Gràfica de potència VS acceleració

La figura 52 ens dóna la informació de la potència que atorga el Piezofilm segons a l'acceleració que estigui sotmès. Aquesta taula s'ha fet amb els resultats de la impedància òptima. Tot i que no són reveladors, les dades no són exactament les correctes.

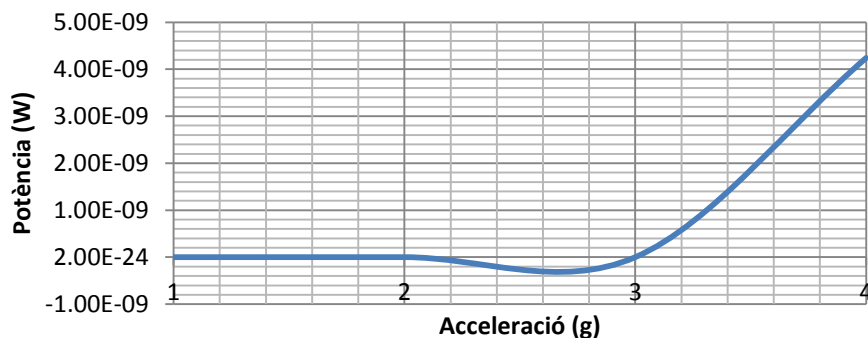


Figura. 52 Gràfica de Potència VS acceleració

Per a concloure aquest apartat, com s'ha vist s'han realitzat diferents test per decidir quin element és el millor. Amb els resultats en mà, directament es pot dir que el Minisense, és el que millor resultats dona. Arriba a proporcionar $4,45 \mu\text{W}$ amb una acceleració de 4 g i amb una resistència de càrrega. Per el contrari el Piezofilm amb massa directament no es pot fer servir perquè la freqüència de ressonància es inferior a la que es vol ajustar (50 Hz), queda directament descartat. Per tant l'element piezoelèctric que es farà servir en el prototip serà el Minisense.

Capítol 11:

Càlculs camp magnètic

El camp magnètic, \vec{H} , generat per un cable amb una corrent és descrita per la llei de Biot-Savart:

$$r > a, \quad \vec{H} = \frac{i}{2\pi r} u_t x u_r \quad (66)$$

$$r < a, \quad \vec{H} = \frac{ir}{2\pi a^2} u_t x u_r \quad (67)$$

On i és el corrent que passa a través del cable, r és la distància radial entre el centre del cable fins al punt d'interès. u_t i u_r són els vectors unitaris que apunten cap al sentit de la corrent i al punt d'interès, respectivament.

De les expressions (66) i (67) sabem que la força d'un imant permanent amb una magnetització \vec{M} , en un camp magnètic extern, \vec{H} , es pot calcular per integració de la densitat de la força, \vec{f} , sobre el volum del imant, V .

$$\vec{f} = \vec{\nabla}(\vec{M} \cdot \vec{H}) \quad (68)$$

Donat que la magnetització de l'imat és constant, les forces longitudinals es defineixen per:

$$F_{xMx} = B_r \int \frac{dH_x}{dx} dV, \quad F_{yMx} = B_r \int \frac{dH_x}{dy} dV \quad (69)$$

$$F_{xMy} = B_r \int \frac{dH_y}{dx} dV, \quad F_{yMy} = B_r \int \frac{dH_y}{dy} dV \quad (70)$$

On la remanència de l'imat permanent, B_r , és uniforme i orientada en la direcció positiva y (M_x) o direcció x (M_y).

Capítol 12:

Simulació camp magnètic

Per veure el comportament d'aquest fenomen físic com és el camp magnètic, un fenomen imperceptible per l'ull humà. Es farà servir un simulador de camp magnètic per veure detalladament les línies de camp magnètic que es desprenen de un i de dos fils elèctrics.

La importància d'aquestes simulacions és molt gran. Depèn del que es vegi durant aquestes simulacions, es sabrà la posició més òptima que s'haurà de fer servir per treure el màxim partit al camp magnètic que traurem dels dos fils elèctrics.

12.1 Simulació amb un fil elèctric

Per fer-se una idea gràfica de com són les línies de camp magnètic, es comença amb un sol fil elèctric amb una certa càrrega i intensitat. A la figura 53 es veu com el fil a la part central entra cap al full i genera un camp magnètic al seu voltant.

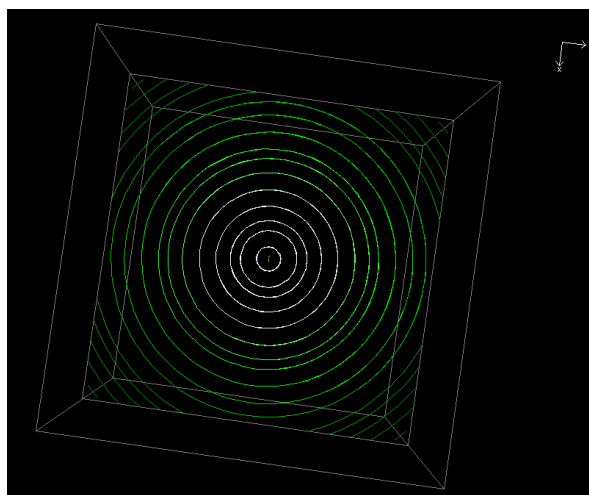


Figura. 53 Camp magnètic produït per un conductor

A la figura 54 es veu aquest camp en tres dimensions. Tot i que a la imatge està segmentat per parts, aquest camp magnètic es dissipa de manera omnidireccional, però perd força segons es propaga per l'espai.

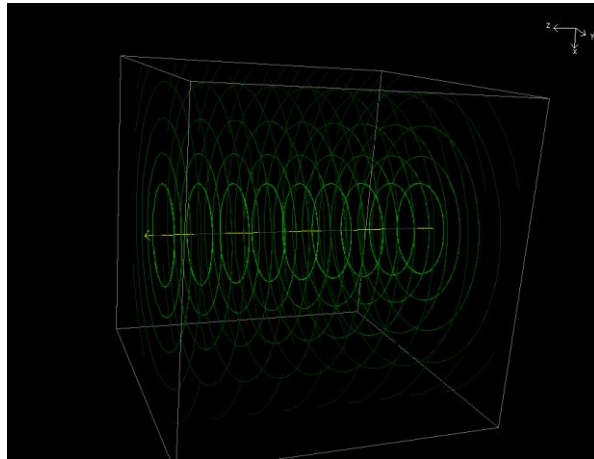


Figura. 54 Vista en tres dimensions del camp magnètic produït per un conductor

Quan es disminueix la intensitat de corrent elèctric que passa per el fil, el camp magnètic també es redueix proporcionalment. Perdent el rang que pot acaparar i perdent força. Això ho es pot visualitzar a la figura 55.

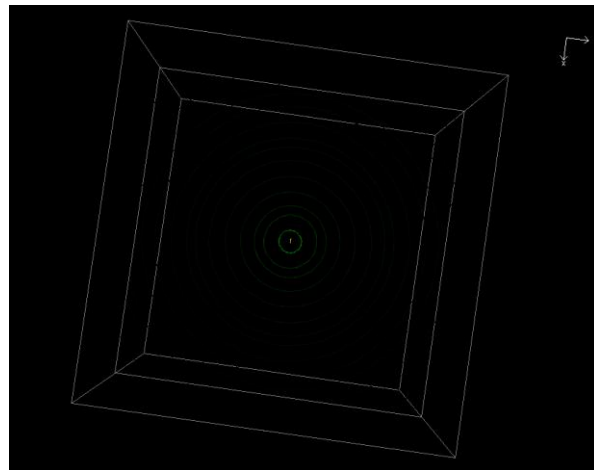


Figura. 55 Camp magnètic amb una menor intensitat elèctrica

A la figura 56 es pot veure els vectors de camp magnètic que rodegen al fil elèctric.

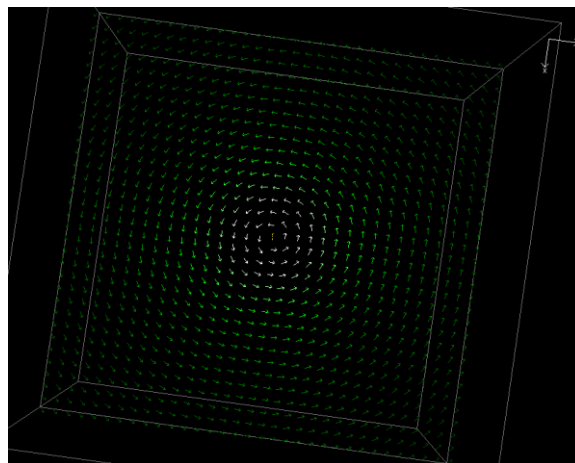


Figura. 56 Vectors de camp magnètic

A la figura 57 es disposen petits trossos de materials ferromagnètics al voltant del fil que interactuen donant voltes al fil elèctric per el camp magnètic que el rodeja.

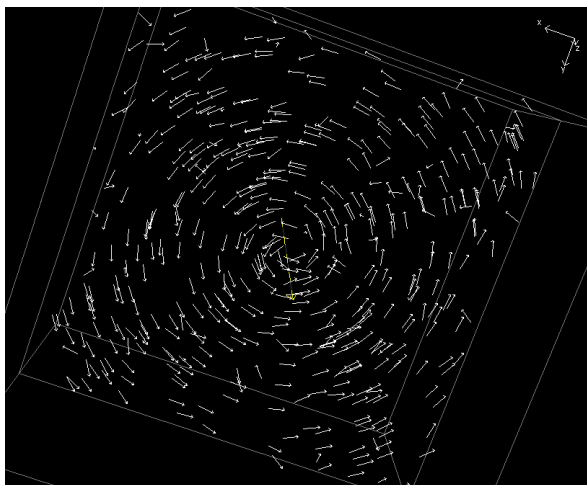


Figura. 57 Disposició de dipòls ferromagnètics al voltant del conductor

12.2 Simulació amb dos fils elèctrics

En aquest apartat es veurà una simulació molt interessant, aquest cop es situen dos fils elèctrics per els quals passa el mateix valor de corrent elèctric. Aquests fils estan disposats en paral·lel l'un respecte de l'altre.

Al conjunt de quatre imatges que formen una seqüència d'apropament dels conductors de la figura 56 mostra un fet molt important per el nostre projecte. Aquest ens està revelant quin és el punt òptim on haurem de col·locar l'imant perquè oscil·li de manera periòdica amb el canvi de polaritat del camp magnètic.

Si s'observa la figura 58.a es veu que les línies de camp magnètic exteriors dels dos conductors interactuen les unes amb les altres, modificant la seva forma de circumferència. A mesura que es van apropant els conductors, les línies de camp magnètic que estan més a prop del conductor, també comencen a ajuntar-se com a la figura 58.c. Aquesta seria la distància idònia per posar l'imant al mig, en aquest punt el camp magnètic es prou fort com per atraure o repel·lir a l'imant (seguint la sinusoïdal del corrent).

Per el contrari si s'observa la figura 58.d, si es segueixen apropant els conductors hi haurà un punt on les línies més properes del conductor s'ajuntin. Els dos conductors es comportaran com un de sol en quan a camp magnètic es refereix. Per aquest motiu no interessa arribar a aquesta situació on l'imant no es mouria de la mateixa manera i faria un moviment molt menys pronunciat que si estigues entremig dels dos conductors.

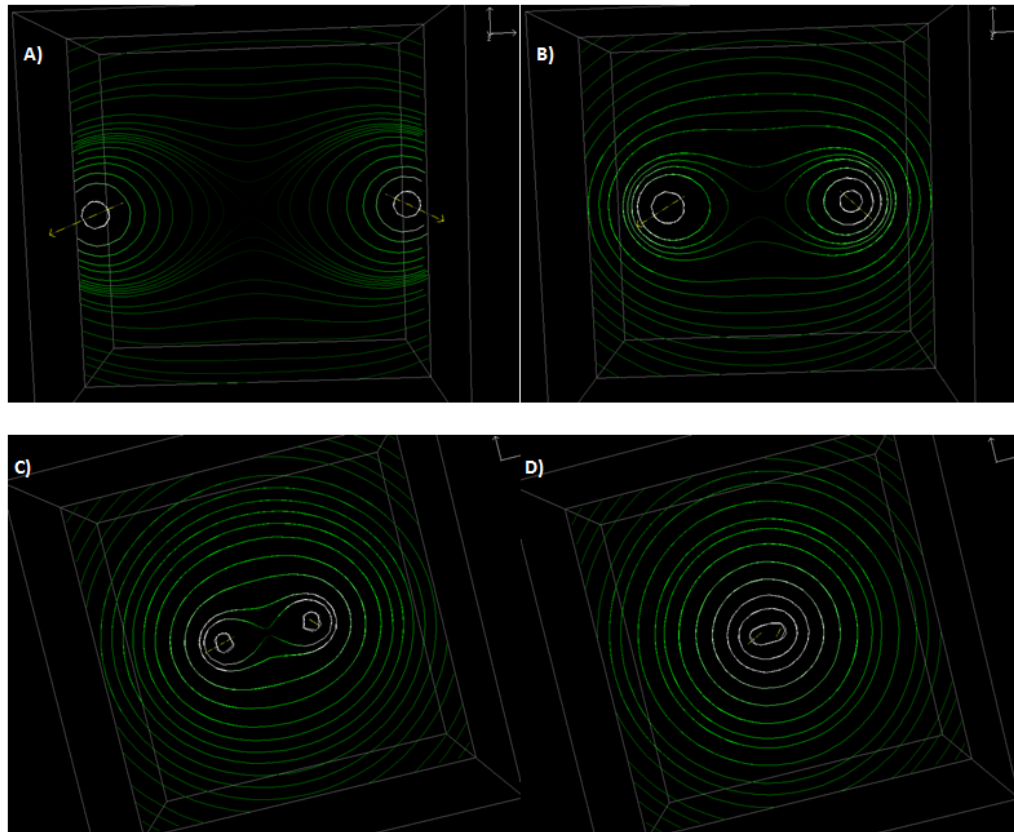


Figura. 58 Seqüència d'apropament de dos conductors circulant la mateixa intensitat elèctrica

La raó de perquè s'està dient que el punt òptim és al centre dels dos conductors, a una determinada distància, es pot veure reflectida a la figura 59. Com havíem comentat a la figura 57 es rodeja els conductors de petits dipols ferromagnètics. Si s'observa aquesta situació es veu com cap dels dipols arriba a entrar a la part central dels conductors. Si es col·loca de manera fixa un dipol ferromagnètic just al centre, aquest començarà a vibrar de manera periòdica. Aquest dependrà de la freqüència a la que circuli el corrent elèctric. Com està subjecte aquest se sentirà repel·lit i atret pels dos conductors.

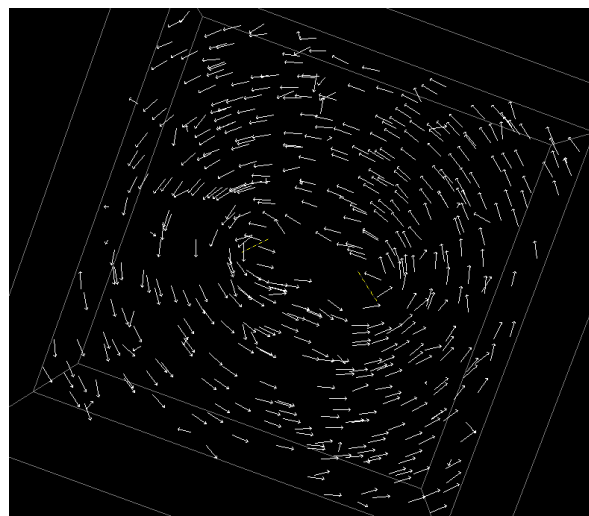


Figura. 59 Disposició de dipols ferromagnètics al voltant dels dos conductors

Com a conclusió d'aquests fets, si gràcies al camp magnètic es pot fer que un imant vibri i la subjecció que fem servir per aquest imant és un cantilever piezoelèctric, podrem treure energia d'aquesta vibració. Tot i que durant el projecte ja s'ha comentat aquest objectiu varies vegades, aquest és una demostració de que és possible portar-la a la realitat.

12.3 Simulació amb Comsol

Tal i com es va fer durant el capítol 10 amb les simulacions dels elements piezoelèctrics, Comsol ofereix la possibilitat de simular els camps magnètics que es dissipen a qualsevol tipus de conductor.

En aquest apartat es veurà la simulació de dos conductors de coure que estan disposats paral·lelament. Els dos conductors estan rodejats per aire. A la seqüència de la figura 60 es pot veure com a mesura que anem aproximant aquests dos conductors, les línies de camp magnètic van acoblant-se. Aquestes línies al Comsol les es veuen com a diferents intensitats de color, el blau cel serien les línies exteriors del conductor. Les zones grogues i vermelles són les que tenen més intensitat de camp magnètic. En aquesta primera simulació els conductors tenen un radi de 2cm.

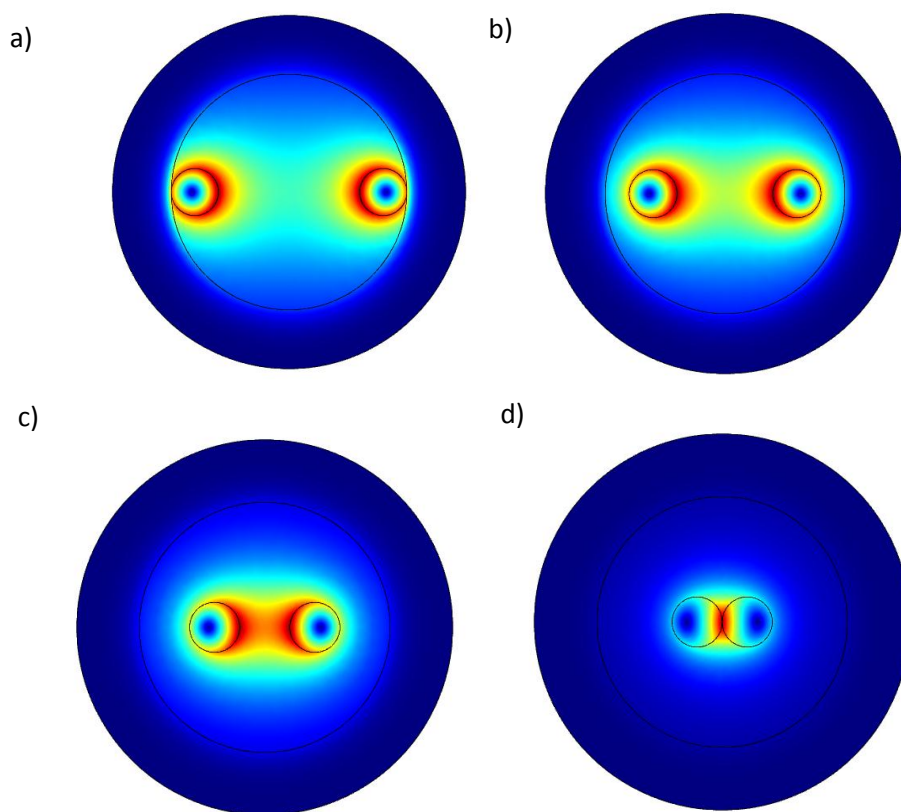


Figura. 60 Seqüència d'apropament de dos conductors amb Comsol

Si s'observa amb atenció la figura 60.c es veurà que en aquest punt les zones més fortes de camp magnètic es concentren entre els dos conductors. Aquesta imatge ens pot recordar a la que anteriorment havíem vist a la figura 58.c, aquest seria el punt òptim per col·locar l'imant.

Ara bé a la figura 60.d, com en el cas de la figura 58.d, quan els conductors arriben a estar en contacte o gairebé, es produeix l'acoblament de camps magnètics i es comporta com si només hi hagués un sol conductor.

Ja que en l'anterior programa de simulació de camps magnètics no es podia modificar el radi del conductor, es comprovarà que passa si es varia la secció del conductor. Com es veu a les imatges de la figura 61, hem reduït el radi a 5 mm. Si pel conductor hi està passant la mateixa quantitat de corrent elèctric i s'allunyen els conductors, el seu camp magnètic és veu molt més reduït. Com en els altres casos a mesura que s'apropen es van acoblant les seves línies de camp magnètic, mica en mica es van acoblant les línies de camp magnètic. D'aquestes imatges es pot extreure que el camp magnètic que produeix un conductor quan hi passa una corrent és directament proporcional a la secció del fil elèctric.

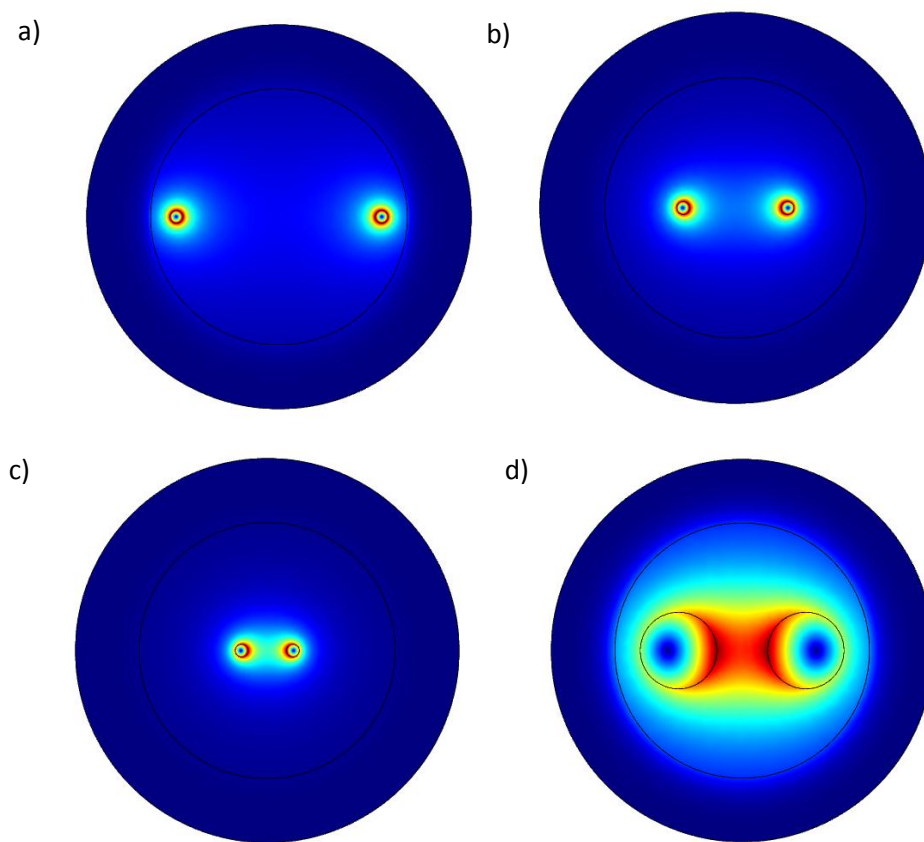


Figura. 61 Proves amb diferents seccions de conductor

Per fer una última comprovació d'aquest fet a la figura 61.d, s'ha augmentat el radi del conductor a 3 cm i s'hi fa passar la mateixa intensitat. Com es pot veure el camp magnètic avarca molt més espai que en el cas de la figura 58.c. Amb el que es pot dir que si la secció del conductor és més gran, més gran serà el camp magnètic.

Capítol 13:

Mesures de consum

L'objectiu d'aquest punt és el de conèixer quines són les potències que es consumiran per posteriorment poder-les associar a una acceleració o potència donada pel piezoelèctric. Els elements que es faran servir com a consumidors de potència són dos calefactores elèctrics. Els calefactores presenten unes potències de consum molt elevades. Si es reflexiona que per el projecte interessa tindre un gran consum de potència, més potència més intensitat elèctrica, més intensitat elèctrica més camp magnètic al voltant del conductor.

Com per fer les proves experimentals es necessita bastant consum, s'ha pensat en aquest punt fer una taula amb els diferents consums que es pot tindre i catalogar-los amb un nom que el diferenciï.

13.1 Consum Braun H-100

El Braun H-100 ofereix tres posicions de funcionament, la primera posició només treu aire a temperatura ambient, funciona com a ventilador. La segona posició treu aire calent, i la tercera treu aire encara més calent. A la taula 7 es veuen els consums que fa aquest calefactor.

Braun H-100	Tensió (V)	Intensitat (A)	Potència (W)
Posició 1	220	0.16	35.2
Posició 2	218	5.3	1155.4
Posició 3	214	8.5	1819

Taula. 7 Consums del calefactor Braun H-100

13.2 Consum Marux T-910/3

El Marux T910/3 ofereix tres posicions de funcionament, la primera posició només treu aire a temperatura ambient, funciona com a ventilador. La segona posició treu aire calent, i la tercera treu aire encara més calent. A la taula 8 es veuen els consums que fa aquest calefactor.

Braun H-100	Tensió (V)	Intensitat (A)	Potència (W)
Posició 1	220	0.82	180.4
Posició 2	218	4.2	915.6
Posició 3	216	8.2	1771.2

Taula. 8 Consums del calefactor Marux T-910/3

13.3 Consums totals

En aquest apartat es farà la taula de consums totals. A la taula 9 es poden veure aquests valors i noms. A partir d'ara quan els calefactores consumeixin aquestes potències directament se'ls dirà Consum 1 o Consum 2 o el que sigui.

Nom	Potència (W)
Consum 1	215.6
Consum2	1155.4
Consum 3	1819
Consum 4	2670
Consum 5	3590.2

Taula. 9 Nomenclatura de les potències

Capítol 14:

Circuit condicionador EH300

Un cop s'obté una senyal sinusoidal dels elements piezoelèctrics s'ha de fer un procés de conversió a tensió continua. Es recorda que s'ha d'alimentar a un microprocessador que necessita entre 1,82 V i 2 V de continua per poder operar correctament.

Aquesta tasca l'haurà de desenvolupar un conjunt d'elements electrònics que transformin i rectifiquin la senyal dels piezoelèctrics. Existeix un petit circuit del fabricant "Advanced Linear Devices, Inc" que s'encarrega de comercialitzar uns elements condicionadors de senyal.

El circuit en concret que es farà servir en aquest projecte és el model EH300 com el

que es pot veure a la figura 62. Aquest mòdul està dissenyat especialment per el Energy harvesting, treballa a partir de tensions tan AC com DC.



Figura. 62 Circuit condicionador EH300

És un element totalment auto-alimentat, vol dir que no cal una alimentació externa que proporcioni energia elèctrica als circuits integrats que porta. Amb la pròpia tensió que està obtenint de la seva entrada, extreu energia suficient per alimentar els circuits integrats de molt baix consum.

Estan preparats per acceptar tensions en AC o DC, des de 0 V fins a ± 500 V i unes corrents d'entrada des de 200 nA fins a 400 mA. Presenta uns rangs de funcionament molt amplis. Està dissenyat per aguantar canvis bruscs que pot haver amb l'alimentació del Energy harvesting. Segons la font d'energia que la aprovisioni pot variar molt.

En concret el model que s'està comentant pot proporcionar tensions en continua d'entre 1,8 i 3,6 V, que són les tensions que la majoria de microprocessadors necessiten per poder operar.

14.1 Mode de funcionament



Figura. 63 Esquema dels pins del EH300

El circuit té 2 pins de connexió d'entrada on es connecta la font d'energia i té 4 pins de sortida, com es pot veure a la figura 63. Els pins de sortida són: Ground (terra), Vr(Ready), +V que indica l'estat de càrrega del condensador i Vp (Output) que és la sortida del circuit.

En el moment que comença a rebre una intensitat el circuit ja comença a funcionar, aquest instant el serà denominat com a l'instant t1. En aquest instant tant Vr com +V donaran la mateixa senyal i Vp no ens donarà cap. Això es pot veure en la gràfica de comportament del circuit a la figura 64.

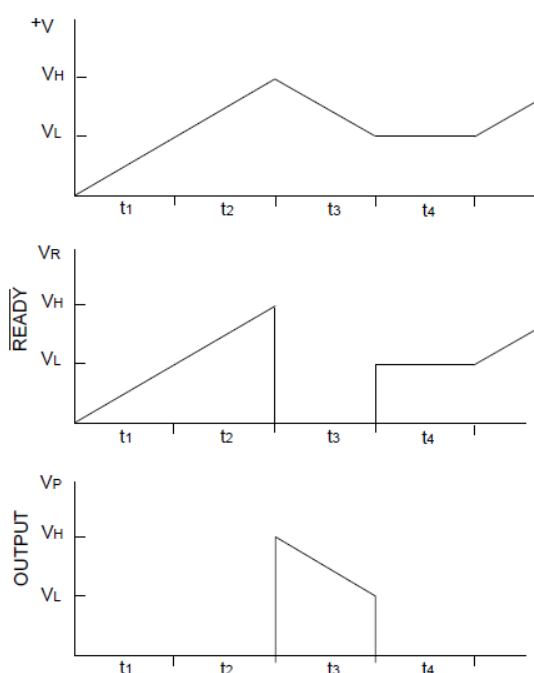


Figura. 64 Gràfiques de comportament del EH300

El t1 finalitza quan la càrrega arriba a 1,8 V (VL), llavors entra en l'instant t2. Com es pot veure a la figura 64, el comportament és el mateix que durant t1. +V i Vr segueixen la mateixa forma i Vp no dona senyal. Aquest instant és així fins que el condensador arriba a carregar-se fins als 3,6 V (VH).

Un cop el condensador està al màxim de càrrega succeeixen varies coses, entrem a l'instant t3. Vr provoca un flanc de baixada. Vr dona una senyal nul·la, per això serveix aquesta sortida. Una possible situació seria, tenim un microcontrolador connectat a aquesta sortida i aquest micro necessita una senyal de flanc de baixada per posar-se en mode ON. Vr proporciona aquest flanc de baixada quan el circuit està prou carregat com per funcionar correctament.

Vp, ja proporciona una senyal continua que depèn de la càrrega del condensador. Si no es subministra més energia a l'entrada del circuit, el condensador (+V) començarà a descarregar-se fent d'aquesta manera que Vp també segueixi la descàrrega del condensador. Si la font d'energia

segueix entregant intensitat el circuit donarà una tensió de sortida estable. L'instant t_3 succeeix fins que el condensador (+V) arriba a descarregar-se fins VL. En aquest punt s'arriba a l'instant t_4 .

A l'instant t_4 , quan V_r detecta que està per assota de VL, torna a seguir la mateixa forma que la del condensador (+V). V_p deixa de donar senyal, s'hauria de tornar a arribar a VH perquè tornés a funcionar. Es pot dir que en aquest instant es torna a l'inici de funcionament com a t_1 , amb la diferència que el condensador està entre 0 i VL.

Un element important a tindre en compte en aquest circuit és que com se li aplicarà una senyal sinusoidal, al passar pel pont rectificador de díodes, ja no es tindrà en compte la tensió pic a pic sinó l'amplitud. Per exemple si hi ha un senyal de 4 al passar pel pont quedarà reduït a menys de 2V, els díodes es queden 0,2V aproximadament per poder conduir, això ho es pot veure gràficament a la figura 65. Els circuits integrats també necessiten una petita alimentació que s'ha de tindre en compte. En el pròxim punt del projecte es sabrà quina és la tensió que realment és queda el circuit.

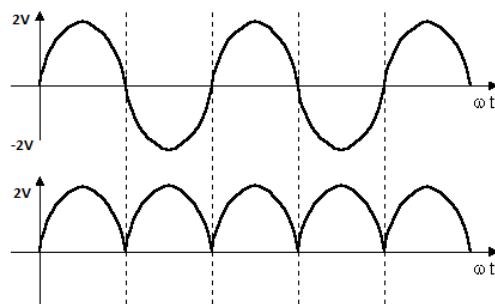


Figura. 65 Rectificador ona completa

Capítol 15:

Proves amb el circuit condicionador EH300

En aquest apartat s'estudia el comportament del EH300. És important primer comprovar i entendre el seu correcte funcionament, així quan fem proves amb el piezo més el condicionador sabrem què ha de fer el EH300.

El que veurem en els següents apartats són diferents proves amb diferents condicions. Ajustarem una tensió d'entrada que ens vindrà atorgada per el generador de senyals. Entrarà una tensió sinusoïdal, amb una freqüència de 50 Hz i una amplitud que anirem variant. D'aquesta manera es pot simular el comportament del piezo.

Es visualitzaran les tres sortides que ens proporciona el circuit EH300 i veurem la senyal del +V, del V_r (*ready*) i del V_{out} .

15.1 Comportament fins a l'instant t_2

En aquest subapartat veurem com reacciona el circuit fins a l'instant t_2 , a la figura 66 es veu la seva gràfica de comportament.

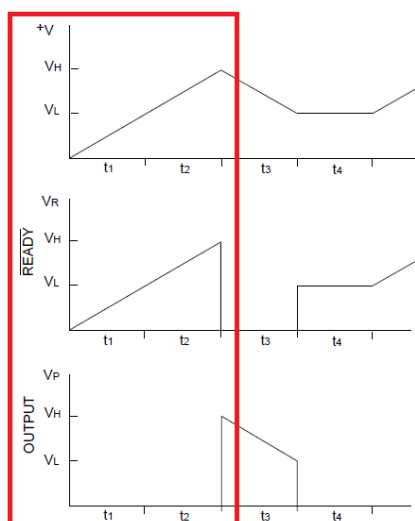


Figura. 66 Gràfica de comportament fins a l'instant t_2

Tal i com comentàvem al Capítol 14, la tensió low (VL) és de 1,8 V i la tensió high (VH) és de 3,6 V.

15.1.1 Tensió d'entrada 4 Vpp

A la figura 67 es veu el primer resultat de la prova, on hi ha la sortida +V que és l'estat del condensador i la Vout que és la sortida del circuit. Tal i s'ha comentat en l'apartat 14, si fem entrar al circuit una senyal de 4, al rectificar a mitja ona, l'amplitud serà de 2 V. I a més, el circuit consumirà 0,5 V per poder funcionar. Amb això, la tensió que veu el condensador en aquest cas és la meitat. El condensador arribarà a emmagatzemar 1,5 V. Per tant Vout no veu prou tensió com per donar senyal.

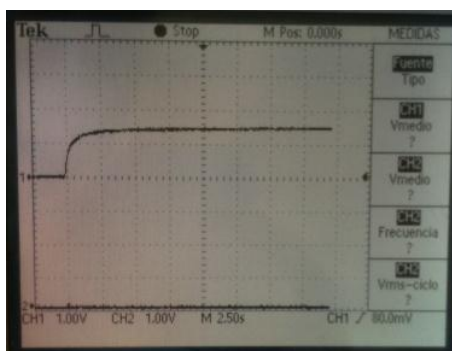


Figura. 67 Primera senyal (+V), segona senyal (Vout)

A la figura 68 la sortida Vr segueix el comportament del condensador (+V) com indica la gràfica de la figura 66.

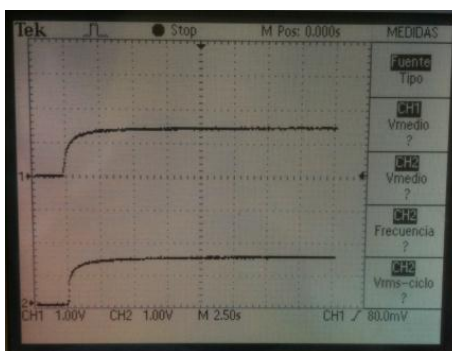


Figura. 68 Primera senyal (+V), segona senyal (Vr)

15.1.2 Tensió d'entrada 8 Vpp

En aquest cas a la figura 69 estem a punt d'emmagatzemar la tensió necessària per a que funcioni Vout, però encara no és suficient. (En necessitava 3,6 V).

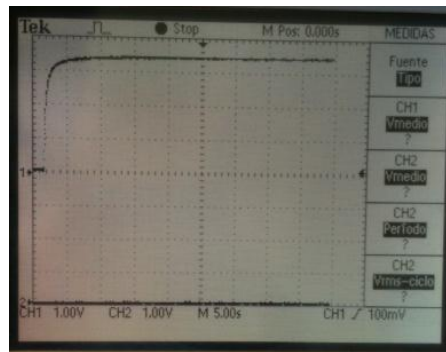
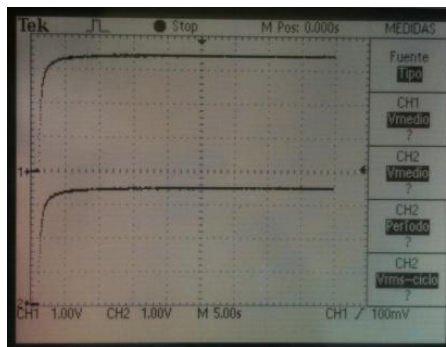


Figura. 69 Primera senyal (+V), segona senyal (Vout)

A la figura 70 es veu com efectivament, V_r segueix la mateixa forma que +V.

Figura. 70 Primera senyal (+V), segona senyal (V_r)

15.1.3 Tensió d'entrada 8,4 Vpp

Quan li apliquem una tensió pic a pic de 8,4 V, rectificat a mitja ona se'ns queda a 4,2 V, menys els 0,5 V que consumeix el circuit. Per funcionar ens resta una tensió de 3,7 V. Com es pot veure a la figura 71, ja s'ha superat el llindar de 3,6 V que necessita el circuit per poder oferir tensió a la seva sortida. Això passa als 4,5 segons d'injectar-li tensió, i ara sí que la Vout ens atorga una tensió continua de 3,7 V.

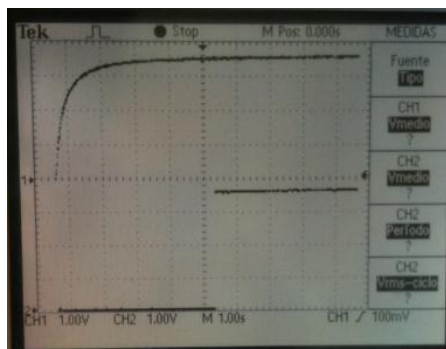


Figura. 71 Primera senyal (+V), segona senyal (Vout)

Amb la tensió que li hem donat passen varies coses. Com ja em vist, fins ara les dues senyals seguien la mateixa forma, en canvi ara, la sortida V_r provoca un flanc de baixada i es queda sense tensió, això ho es pot veure a la figura 72.

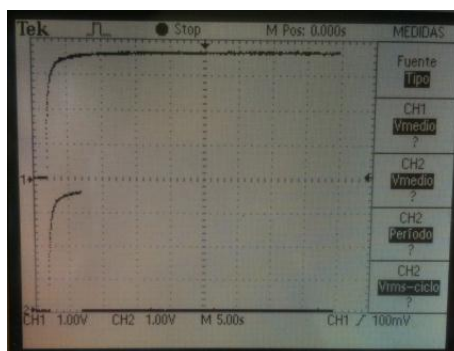


Figura. 72 Primera senyal (+V), segona senyal (V_r)

15.2 Comportament des de l'instant t_2

Fins ara hem vist com es comportava el EH300 a la seva càrrega, anem a veure que passa quan li traiem la seva font d'energia. A la figura 73 es pot veure el comportament gràfic d'aquest instant ressaltat pel requadre vermell.

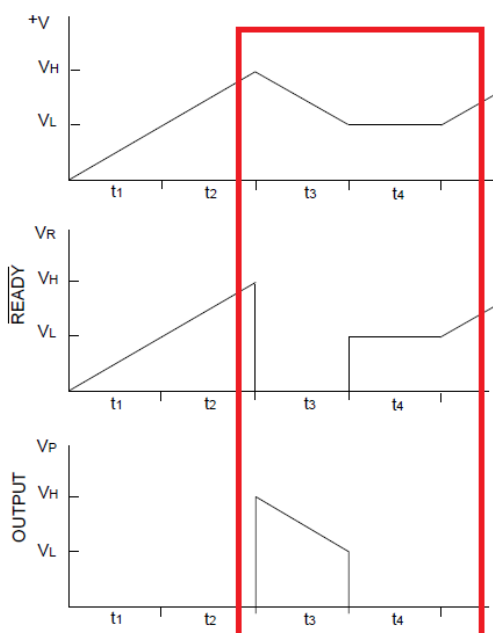


Figura. 73 Gràfica de comportament a partir de l'instant t_2

A la figura 74 es pot apreciar el comportament de +V i de V_r . +V, al no rebre energia es va descarregant lentament.

Amb V_r el comportament és diferent, tal i com havíem comentat en l'anterior subapartat quan s'arriba a V_H , V_r provoca un flanc de baixada i es queda a 0 V, aquest és el moment t_3 .

Això passa fins el punt en que la tensió del condensador disminueix de 1,82 V (VL) i entrem a l'instant t4. Si Vr detecta que es baixa d'aquesta tensió, Vr torna a ser operatiu i torna a seguir la mateixa forma de +V. A l'instant 15 s de la figura 74, es torna a injectar energia, i es veu com +V i Vr segueixen la mateixa forma. Es pot dir que el comportament és exactament igual al de la gràfica de la figura 73.

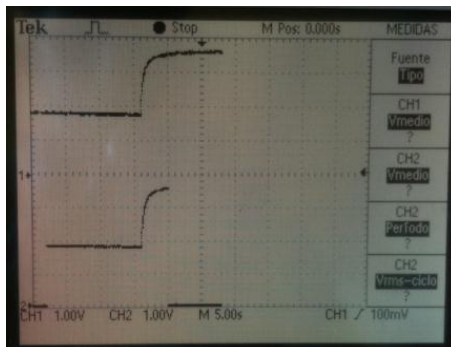


Figura. 74 Primera senyal (+V), segona senyal (Vout)

De la mateixa forma que en l'anterior cas s'ha superat VH i em deixat de subministrar energia per comprovar el comportament de la sortida a la figura 74 es veu com en el moment en que +V baixa de 1,82 V, la sortida deixa de subministrar energia. Es queda a 0 i entrem en l'instant t4 (segon 13 de la gràfica).

Lavors es pot dir que es torna a l'instant inicial i que perquè torni a donar senyal Vout hauríem d'arribar a VH un altre cop. Com es pot veure al segon 23 de la gràfica, un cop que li hem tornat a subministrar energia a +V i superem VH, Vout ens torna a donar tensió continua a la sortida.

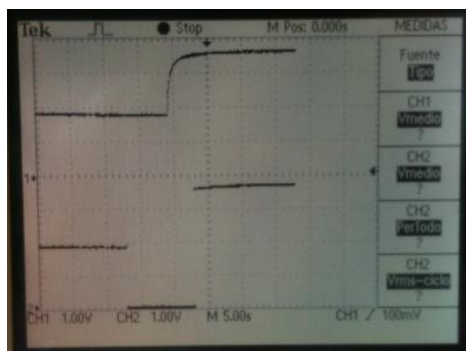


Figura. 75 Primera senyal (+V), segona senyal (Vr)

Un cop realitzat aquest experiment pràctic del circuit EH300, hem confirmat i entès com funciona realment, i podrem treballar amb ell durant el Bloc III de manera més eficient.

Capítol 16:

Elecció dels components

La elecció dels components ha estat un dels punts més difícils del projecte. Com a la vida real que hauré d'afrontar pròximament com a enginyer, he hagut de buscar els proveïdors, característiques dels materials i preus més òptims per el desenvolupament del projecte.

La qüestió resideix en que potser un componen és perfecte per al teu objectiu, però el fabricant pot no disposar del material en aquell moment o l'empresa per a la que treballes no pot comprar a segons quins proveïdors per protocol, etc. Al final he pogut trobar un equilibri correcte entre les peces que es necessitaven i la seva disponibilitat.

Als següents punts veurem quins han estat aquests components i perquè han estat triats.

16.1 Imant

La elecció de l'imat no va suposar cap problema en aquest cas. Tal i com vaig calcular a l'apartat 8.1.1 necessitàvem una massa de 1,68 grams. L'element que es va trobar que complís les especificacions va ser l'imat que es pot veure a la figura 76. Aquest presenta una grau de magnetització N48 (el grau més alt és el N50). Un alt grau de magnetització ens proporcionarà més força de subjecció, en concret de 2,45N.

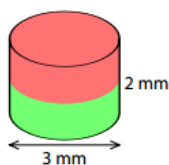


Figura. 76 Imant Neodimi

A la taula 10 s'observen totes les seves característiques. Les mides també han estat claus ja que haurem de col·locar dos imants per cantilever. Pel tipus de element piezoelèctric que s'ha triat (que veurem posteriorment en aquest capítol) havia de ser menor de 6mm de diàmetre.

Forma	Disc
Diàmetre	3mm
Altura	2mm
Tolerància de la longitud	$\pm 0,1\text{mm}$
Sentit de la magnetització	axial (paral·lel a l'altura)
Material	NdFeB(Neodimi-Ferro-Bor)
Tipus de recobrint	Níquel
Força de subjecció	aprox. 250grams aprox.2,45N
Pes	0,1074 grams
Tipus de fabricació	sintetitzat
Magnetització	N48
Temp. Màxima ús	80°C
Temp. De Curie	310°C

Taula. 10 Característiques imant Neodimi

16.2 Element Piezoelèctric

El cas del piezoelèctric, és el que ha portat més problemes, i és la part més important del dispositiu. Les característiques d'aquests de la marca *MIDÉ*, amb els quals vam fer els càlculs de l'apartat 8.4 i 8.5, eren les millors per desenvolupar la tasca de recol·lectors d'energia. Però per afers aliens al projectista no es varen poder aconseguir. Per tant, entre els elements piezoelèctrics que es disposaven es va optar per els "*Minisens 100 Vibrator Sensor*" de la casa *Measurment Specialties*.

Aquests, com vàrem calcular a l'apartat 8.1 eren un dels que ens permetien afegir una massa per poder ajustar la seva freqüència de ressonància a 50 Hz. Les mides d'aquests elements són bones, com a contrapartida dels de la marca *MIDÉ* que eren massa grans, aquests presenten mides molt més petites, es poden veure a la figura 77.

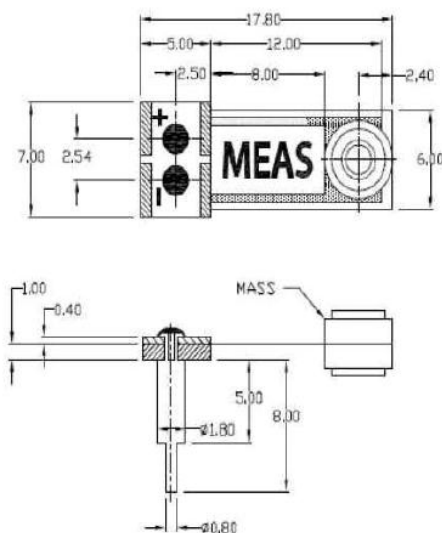


Figura. 77 Mides del Minisense 100

16.3 Circuit condicionador

Tot i que perfectament es podria haver dissenyat un circuit condicionador per senyals petites com les que rebíem del cantilever, es va triar la opció de fer servir un circuit ja especialitzat per aquesta tasca. A la enginyeria no tot es dissenyar sinó buscar els elements ja desenvolupats. Cal saber adaptar-los a les necessitats pròpies.

El funcionament i característiques del circuit ja s'han estudiat al capítol 14, per tant no s'explicarà més sobre aquest tema.

16.4 Estructura

És clar que tots els elements abans mencionats hauran d'anar en algun lloc col·locats i de certa forma per poder recollir el camp magnètic dels conductors. La idea per muntar la nostre estructura serà la de fer servir el *Meccano*, encara que no és la manera més maca o mes correcte per desenvolupar un prototip. En el cas que el prototip es portés a la fabricació, ja es farien servir altres materials.

Bloc III:

Prototip Energy

Harvester

Capítol 17:

Dispositius piezoelèctrics i EH300

En aquest apartat es farà un estudi del comportament de dos dels elements que es faran servir per el prototip final. Veurem els resultats que donen els elements piezoelèctrics junt amb el EH300.

17.1 Canvi de condensador

El circuit condicionador EH300 porta un condensador de sèrie de 1 mF. A la figura 78 es pot veure la gràfica de carrega amb el condensador de 1 mF alimentat per els 4 Minisens amb una acceleració de 4 g.

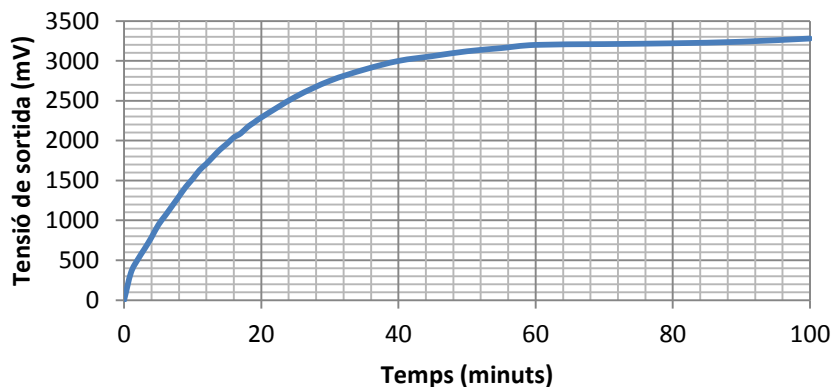


Figura. 78 Càrrega amb condensador de 1 mF amb una acceleració de 4 g

Les condicions d'aquest test són:

- 4 Minisens
- 4 g d'acceleració aplicada
- Freqüència de ressonància a 66 Hz

Necessitem 100 minuts per carregar el condensador a 3,28 V i emmagatzemar una energia de 5,37 mJ. Per l'aplicació que es vol donar, que consisteix en enregistrar dades de temperatura cada 10/15 minuts aproximadament, no resulta eficient. Per resoldre aquest problema s'ha procedit a modificar el circuit EH300. Si el problema és, que el condensador té una capacitat gran i per tant

una constant de càrrega també gran(per l'aplicació), es pot modificar. Es pot col·locar una capacitat que optimitzi els temps. Per exemple, si necessita 100 μJ per funcionar, es pot buscar una capacitat que emmagatzemi 150 μJ . Si es fa això s'aconseguirà reduir el temps de càrrega i optimitzar l'aplicació.

Encara que aquest canvi també té un preu, al canviar la capacitat per una de més petita, quan el EH300 arriba als 3,62 V en els quals ja dona senyal de sortida, la descarrega del condensador és més pronunciada que amb el condensador original, l'energia emmagatzemada no serà la mateixa, es veurà reduïda també. Tot i que no és dolent perquè com ja s'ha dit, això ofereix una flexibilitat a l'hora de treballar amb el EH300.

17.2 Prova amb diferents condensadors

En aquest apartat es faran varies proves amb diferents condensadors i condicions, per veure quin d'ells ens donarà senyal de sortida.

17.2.1 Temps de càrrega

En aquesta primera prova es fan servir 4 Minisense, amb un condensador de 100 μF , una acceleració de 2 g i sense aplicar cap càrrega al circuit. El resultat es pot veure a la gràfica de la figura 79. L'energia que s'emmagatzema en 10 minuts és de 648 μJ . En 10 minuts s'aconsegueix carregar el EH300 com perquè pugui donar tensió a la sortida.

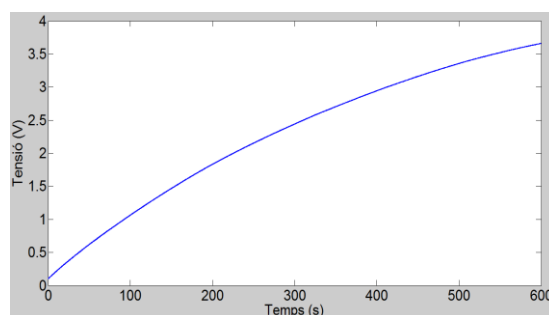


Figura. 79 Temps de càrrega amb condensador de 100 μF i amb una acceleració de 2 g

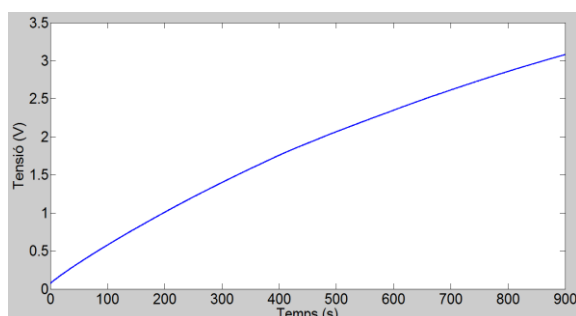


Figura. 80 Temps de càrrega amb condensador de 200 μF i amb una acceleració de 2 g

A la següent prova es faran servir exactament les mateixes condicions però amb un condensador de 200 μF . Ara hem hagut d'augmentar el temps de la gràfica. Al tindre el doble de capacitat, hauria de trigar aproximadament el doble en carregar-se, a la figura 80 no ha arribat als 3,6 V. Es pot intuir que trigarà uns 300 segons més en arribar als 3,6 V. Emmagatzema una energia de 1,02 mJ.

A la figura 81 tornem a fer els test amb les mateixes condicions però amb un condensador de $300\ \mu\text{F}$ i un temps de 30 minuts. Com a la figura 80, la gràfica es queda als 3,4 V. Es necessitaran uns 35 minuts per carregar-lo a 3,6 V. Emmagatzema una energia de 1,73 mJ.

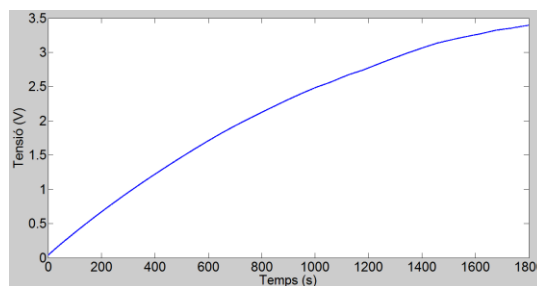


Figura. 81 Temps de càrrega amb condensador de $300\ \mu\text{F}$ i amb una acceleració de 3 g

En aquesta última prova es posa un condensador de $200\ \mu\text{F}$, una acceleració de 4 g i una resistència de càrrega de $1,17\ \text{M}\Omega$. En aquest cas la freqüència de ressonància ha variat perquè hem variat el mètode de com fem el test. S'han col·locat els cantilevers piezoelèctrics en una placa de prototipat, que serà la que fem servir al model final. Per tant al col·locar la placa fem variar la freqüència de ressonància a 40Hz. Com es pot veure a la figura 82 triguem 1 hora per carregar el circuit a 3,5 V per emmagatzemar 1,225 mJ, la figura 79 trigava aproximadament 35 minuts i amb la meitat d'acceleració. Aquí recau la importància de la càrrega que col·loquem a la sortida del circuit EH300.

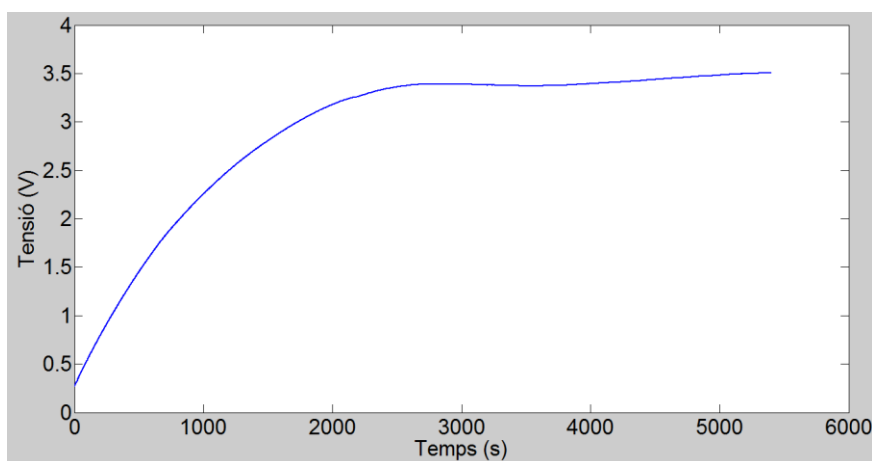


Figura. 82 Temps de càrrega amb condensador de $200\ \mu\text{F}$, una càrrega de $1,17\ \text{M}\Omega$ i una acceleració de 4 g

17.2.2 Temps de descàrrega

Per veure el cicle complet que farà el EH300 alimentat per els piezoelèctrics, hem de fixar-nos en la figura 83. Les condicions del test han sigut 4 components piezoelèctrics a 40 Hz amb una acceleració de 4 g i una càrrega de $26\ \text{M}\Omega$. La primera càrrega la fa des de zero, però un cop que ha fet la primera càrrega fins els 3,52 V en aquest cas, el circuit dóna tensió a la sortida i la càrrega consumeix l'energia emmagatzemada al condensador. Llavors quan baixa de 1,82 V la sortida no dóna energia i torna a carregar-se el condensador, però des de la tensió on s'ha quedat, o sigui, a partir dels 1,82 V. Es pot dir que amb una resistència de càrrega de $26\ \text{M}\Omega$ es pot tornar a enviar senyal cada 30 minuts aproximadament.

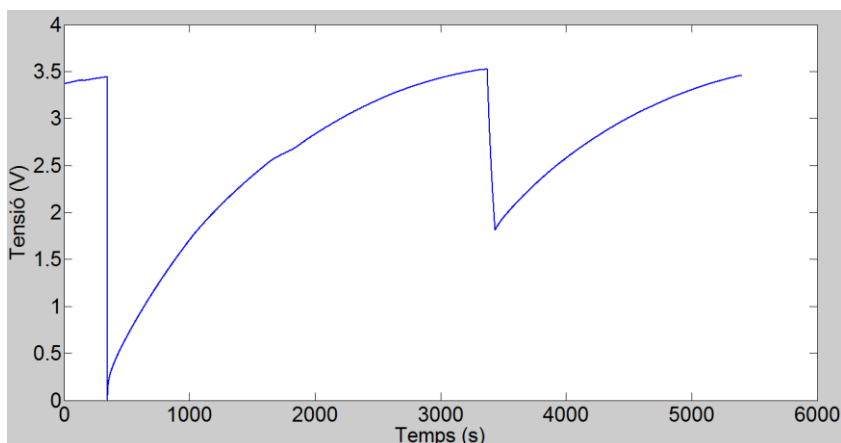


Figura. 83 Cicle de càrrega/descàrrega

La figura 84 mostra més detalladament el moment de la transició quan la sortida del EH300 entrega energia a la resistència de càrrega.

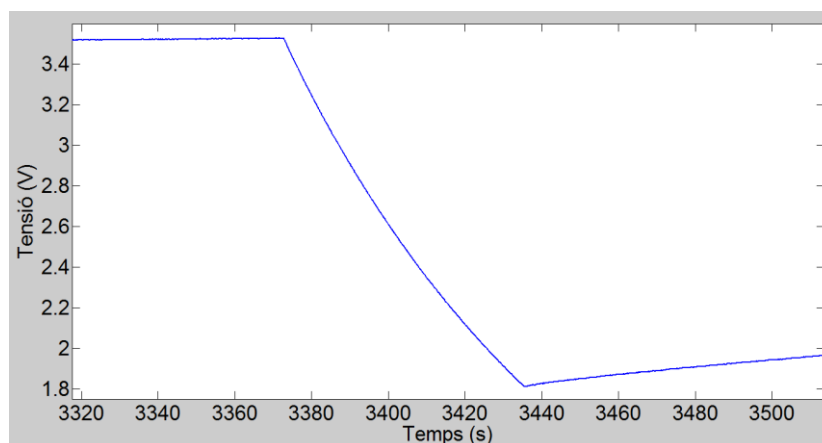


Figura. 84 Temps de descàrrega

La figura 85 reflexa la sortida Vout del EH300. Com es veu a l'instant (3372 s) quan +V arriba a 3,52 V, Vout dona senyal i llavors és consumida per la càrrega. La figura 86 mostra exactament el mateix però hi hem aplicat un zoom perquè es vegi bé aquesta transició. Com es pot apreciar la corba de descàrrega és exactament la mateixa que la del condensador.

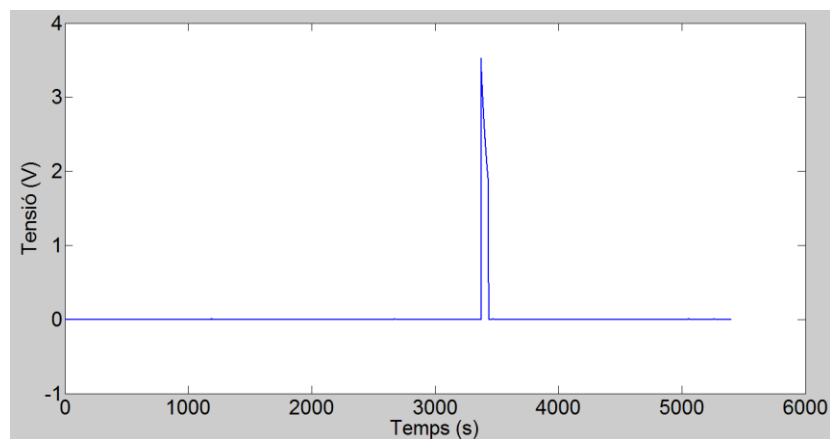


Figura. 85 Sortida Vout EH300

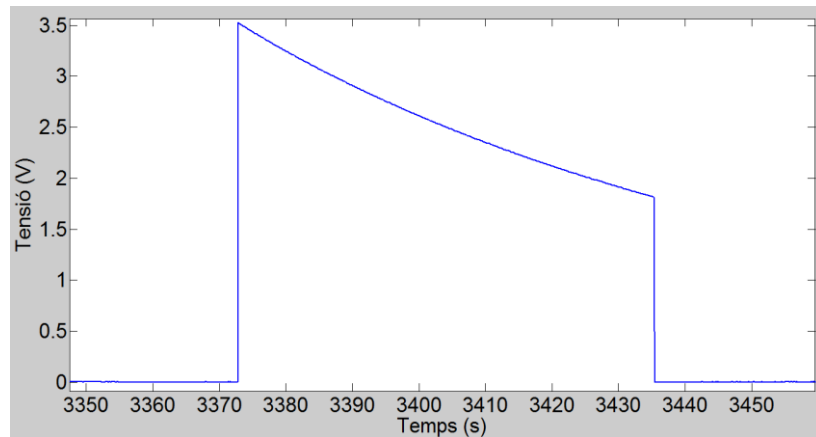


Figura. 86 Zoom de la sortida Vout EH300

17.3 Càlculs de l'energia emmagatzemada

Un cop sabem quan triga a descarregar-se el condensador fins als 1,82 V, es pot saber quina és l'energia que s'ha emmagatzemat al condensador. Els càlculs són els següents:

La càrrega total al condensador és:

$$Q = C \cdot V = 200 \mu F \cdot 3,52 V = 704 \mu C$$

L'energia emmagatzemada al segon 3372:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} 200 \mu F \cdot 3,52^2 = 1,23904 mJ$$

Càrrega final del condensador:

$$Q = C \cdot V = 200 \mu F \cdot 1,82 V = 364 \mu C$$

$$E_{fin} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} 200 \mu F \cdot 1,82^2 = 331,24 \mu J$$

Per tant l'energia consumida per la resistència és:

$$E_{consumida} = E_{inicial} - E_{final} = 1,23904 mJ - 331,24 \mu J = 907,8 \mu J$$

Com la descàrrega que es produeix es aproxima d'una recta la podem calcular de la següent manera:

$$P = \frac{E_{consumida}}{temps} = \frac{907,8 \mu J}{63 s} = 14,40 \mu W$$

$$E_{consumida} = \int_{t_0}^{t_f} P dt = \int_{3373}^{3436} 14,40 \mu W dt = 907,2 \mu J$$

Una manera de saber quina tensió i per lo tant quina energia haurà emmagatzemat el condensador, es pot saber a través de les següents expressions:

$$V_C = E + (V_0 - E)e^{\frac{-t}{RC}} = 7,5 V + (0 V - 7,5 V)e^{\frac{-3370 s}{200 \cdot 10^{-6} F \cdot 26 \cdot 10^6 \Omega}} = 3,57 V$$

E és la tensió que entreguen els dispositius piezoelèctrics

V_0 és la tensió que ja hi havia al condensador

t és l'instant de temps en el que es vol saber la tensió al condensador

En aquesta expressió s'ha calculat la tensió que hi ha a l'instant 3370 s, com es pot comprovar dona aproximadament la mateixa tensió que la de la figura 85. Ara per saber quina tensió manca en el condensador, quan hi ha una descàrrega amb una resistència de càrrega de 26 MΩ, es fa servir la següent expressió:

$$V_C = V_0 e^{\frac{-t}{RC}} = 3,52 \text{ V } e^{\frac{-3436 \text{ s}}{200 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot 26 \cdot 10^6 \Omega}} = 1,81 \text{ V}$$

Aquests càlculs donen pràcticament igual que els resultats reals. Aquestes expressions es poden fer servir per tots els casos de càrrega i descàrrega. A la figura 87 es pot veure gràficament l'energia consumida per la resistència de càrrega.

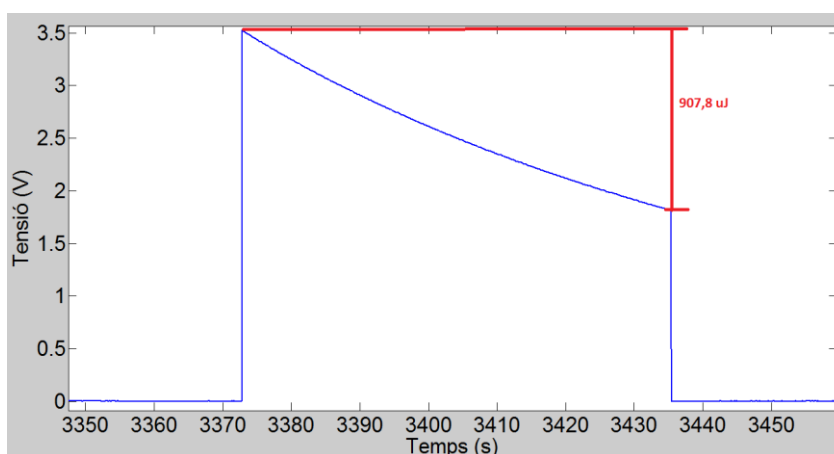


Figura. 87 Consum de la resistència

17.4 Node sensor

L'objectiu del nostre projecte recordem que era el d'alimentar un node sensor. Aquest node sensor pretén agafar mostres, de per exemple, temperatura, guardar-les a una memòria de tipus EEPROM i enviar aquestes dades a un ordinador que pugui processar les dades adquirides.

17.4.1 Estructura del circuit del Node sensor

Els elements que constituïran el node sensor i la seva disposició són els que es pot veure a la figura 88. A continuació es faran una petita explicació de que fa cada mòdul.

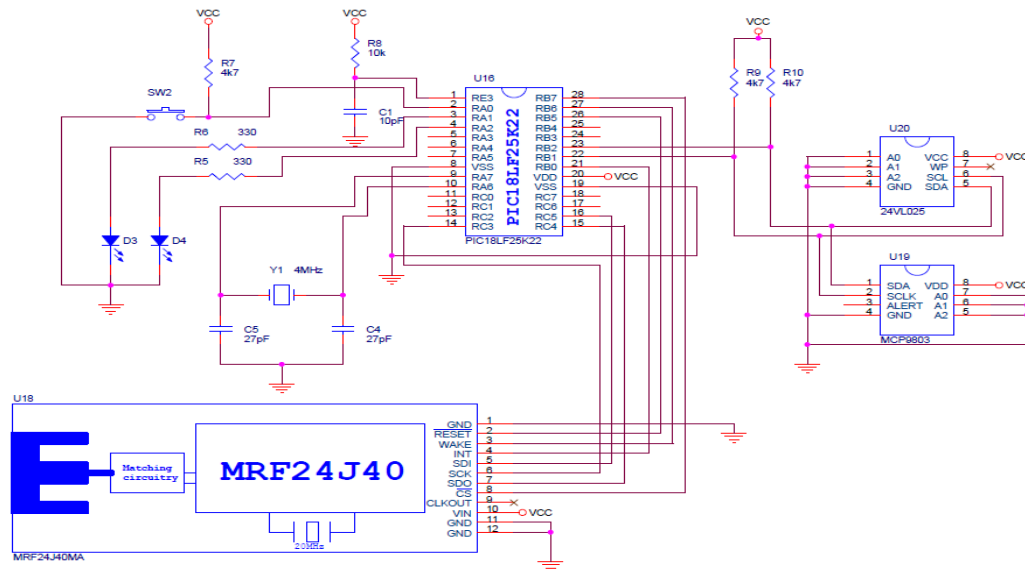


Figura. 88 Esquema del node sensor

El microprocessador PIC18LF25K22, és el cervell del node sensor, és qui dona les ordres de qui i quan ha d'actuar. Té la funció de processar les dades que detecta el sensor i enviar-les al transceptor. En concret aquest microprocessador té una memòria de programes interior, flash de 32Kbytes i una memòria per dades SRAM de 1536 Bytes. Aquest microprocessador té una funció denominada "Watchdog timer", es pot fer que comprovi cada 300 segons, per exemple, la tensió que tenim al condensador, per saber si ja pot funcionar, sinó seguirà esperant.

La memòria externa EEPROM 24VL024, té l'objectiu d'emmagatzemar les dades que el microprocessador li envia. Té una capacitat de 2 Kbits organitzat en un únic bloc de 256x8 bits de memòria amb una sèrie de 2-fils de interfície.

El sensor MCP9803, té com a fi, prendre dades de la temperatura. Com a màxim pot arribar a mesurar temperatures d'entre -55C° a 125C°. Transforma les temperatures a paraules digitals que seran recollides per el PIC18LF25K22.

Per últim tenim el mòdul transceptor MRF24j40, és qui s'encarrega d'enviar les dades a través de la radio-freqüència. Aquest transceptor suporta protocols com el Zigbee, MIWI i MIWI P2P. El que es farà servir serà el MIWI.

17.4.2 Consum dels mòduls

El projectista que ha triat els mòduls, ha fet un recerca d'elements que consumeixin molt poc. El node sensor només serà alimentat per l'energia que li entreguen els piezoelèctrics. A la taula 11 es poden veure els consums que presenta cada mòdul.

<u>PIC18LF25K22</u>	Intensitat	Tensió	Potència	Energia/s
Sleep mode	20 nA	1.8 V	36 nW	36 nJ/s
Watchdog timer	300 nA	1.8 V	540 nW	540 nJ/s
Consum normal	135 µA	1.8 V	234 µW	234 µJ/s
<u>24VL024</u>	Intensitat	Tensió	Potència	Energia/s
Sleep mode	1 µA	1.5 V	1.5 µW	1.5 µJ/s
Consum normal	400 µA	1.5 V	600 µW	600 µJ/s
<u>MCP9803</u>	Intensitat	Tensió	Potència	Energia/s
Sleep mode	0.5 µA	2.7 V	1.35 µW	1.35 µJ/s
Consum normal	200 µA	2.7 V	540 µW	540 µJ/s
<u>MRF24i40</u>	Intensitat	Tensió	Potència	Energia/s
Sleep mode	2 µA	2.4 V	4.8 µW	4.8 µJ/s
Consum normal TX	23 mA	2.4 V	55.2 mW	55.2 mJ/s

Taula. 11 Consum dels mòduls del node sensor

17.4.3 Temps de presa de dades

Ara es veurà si amb l'energia que s'ha emmagatzemat som capaços d'enviar un paquet d'informació a través del node sensor. Per saber això primer hem de saber quin és el consum total que fa el node sensor. Això ho es pot veure a la taula 12.

<u>PIC18LF25K22</u>	Energia/s	Temps de funcionament	Total consumit
Consum normal	234 µJ/s	52 ms	12.16 µJ
<u>24VL024</u>			
Consum normal	600 µJ/s	5 ms	3 µJ
<u>MCP9803</u>			
Consum normal	540 µJ/s	50 ms	27 µJ
<u>MRF24i40</u>			
Consum normal TX	55.2 mJ/s	2 ms	110.4 µJ

Taula. 12 Taula de consum total

Ara ja es sap quina és l'energia que consumeix el node sensor. L'energia que consumeix en total per enviar una trama a un equip receptor, és la suma de les energies que es veuen a la taula 12, **152.56 µJ**. Com coneixem l'energia emmagatzemada per un temps de 3300 segons, que és de 1,239 mJ, només hem de restar-li l'energia que necessita el node. Un cop que ha enviat el senyal el condensador és queda amb una energia total de 1,086 mJ. Per tant per les condicions a les que s'ha fet el test, es pot enviar perfectament senyals, i fins i tot ens sobra energia per enviar trames més llargues.

Capítol 18:

Dispositius piezoelèctrics, EH300 i fil elèctric

18.1 Disseny del prototip i muntatge

Ara que ja coneixem les característiques de tots els elements que formaran part del prototip d'*energy harvester*, es pot procedir a idear una estructura per suportar tots els elements.

18.1.1 Disseny en CAD del prototip

Per fer l'estructura del prototip es faran servir peces de Meccano com havíem dit a l'apartat 16.4, l'estructura serà senzilla però complirà amb el propòsit. Hem fet un disseny amb Autocad per poder mostrar les mides que tindrà el prototip. A la figura 89 es pot veure l'estructura a planta alçada, i a la figura 90 el perfil de l'estructura. Hem inclòs els piezoelèctrics per aclarir com anirà disposat a la realitat.

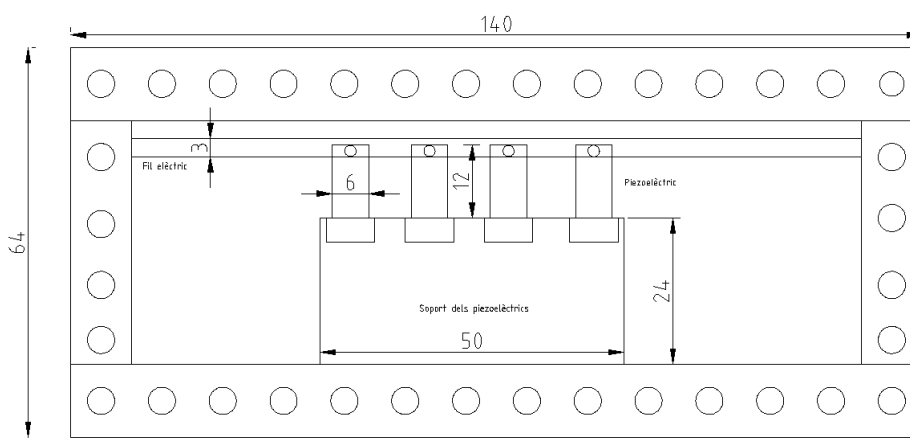


Figura. 89 Vista en planta alçada de l'estructura

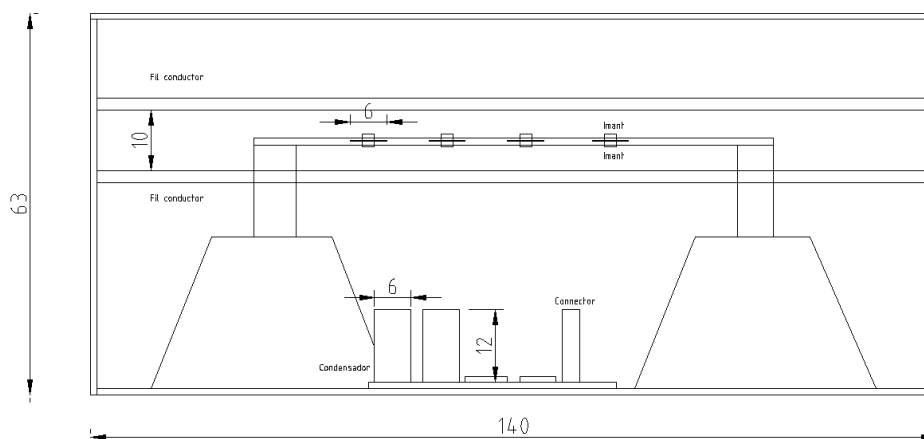


Figura. 90 Vista de perfil de l'estructura.

La raó de perquè s'ha fet servir aquesta configuració, en quant a la col·locació dels imants respecte el fil conductor és la següent: com s'ha pogut veure al capítol 12 el punt on hi ha més camp magnètic és entre els dos conductors, per tant aquest serà el punt òptim.

18.1.2 Muntatge del prototip

Un cop ja tenim tots els elements passarem a fer el muntatge del prototip sencer. A la figura 91 tenim una imatge en planta alçada.

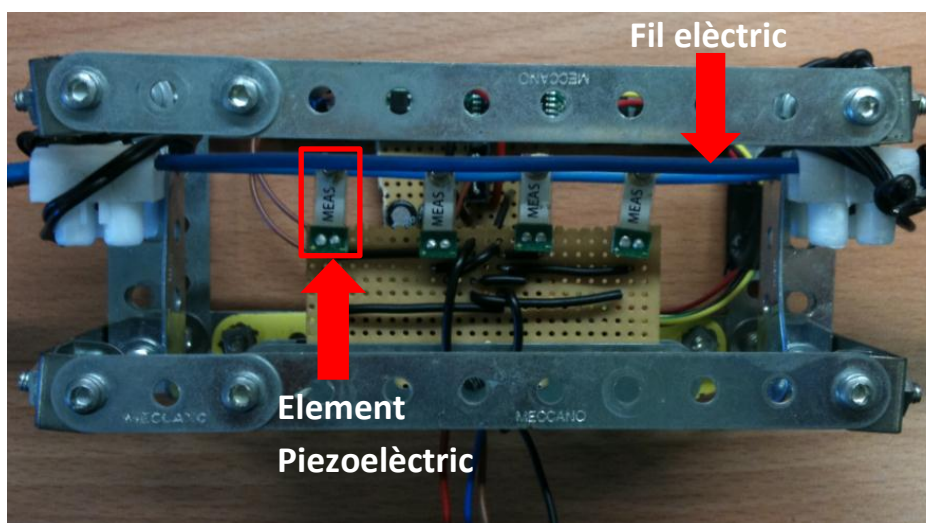


Figura. 91 Prototip en planta alçada

La disposició dels dispositius piezoelèctrics s'ha realitzat sabent que havia d'estar entre els dos conductors. La manera de trobar el punt òptim ha sigut de manera empírica trobant exactament el punt de màxima oscil·lació. Aquesta disposició està a la imatge en perfil, que es pot veure a la figura 92.

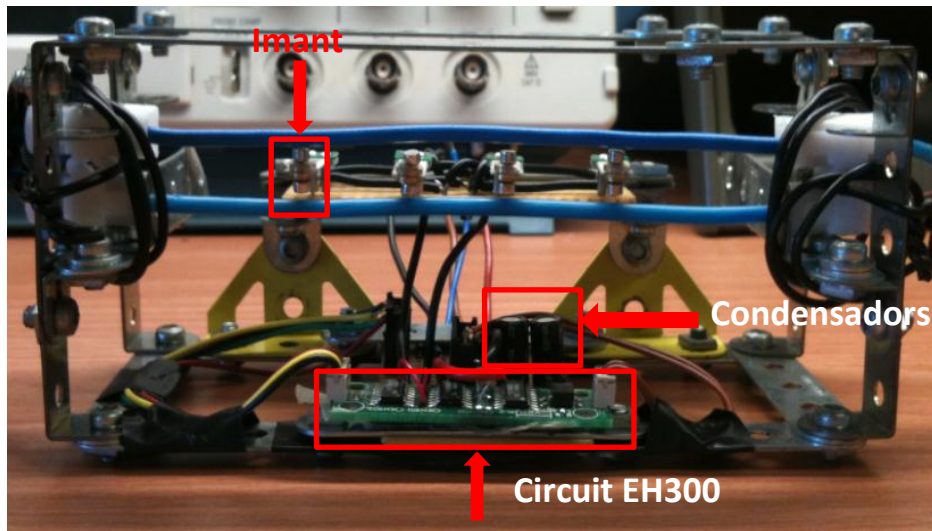


Figura. 92 Vista de perfil del prototip

A la figura 93 es pot observar la vista en general del prototip. Aquest ha estat pensat per col·locar-se en llocs on hi hagi vibracions o llocs on hi passi un corrent elèctric, o fins i tot ambdós. La idea és per exemple col·locar el prototip abans de la caixa central de magneto-tèrmics, on hi conflueix tota el corrent d'un habitatge.



Figura. 93 Vista general del prototip

El prototip que s'ha realitzat té unes mides considerables. El que es vol dir, és que per fer el muntatge al laboratori es fa eficient fer-ho amb Meccano. Però aquest model es pot reduir molt de mida. A la figura 94 es pot veure una imatge en angle del prototip, a la part dreta es poden observar les connexions que té. Aquestes connexions són les pròpies del circuit EH300, aquí es pot connectar el node sensor del projecte associat.

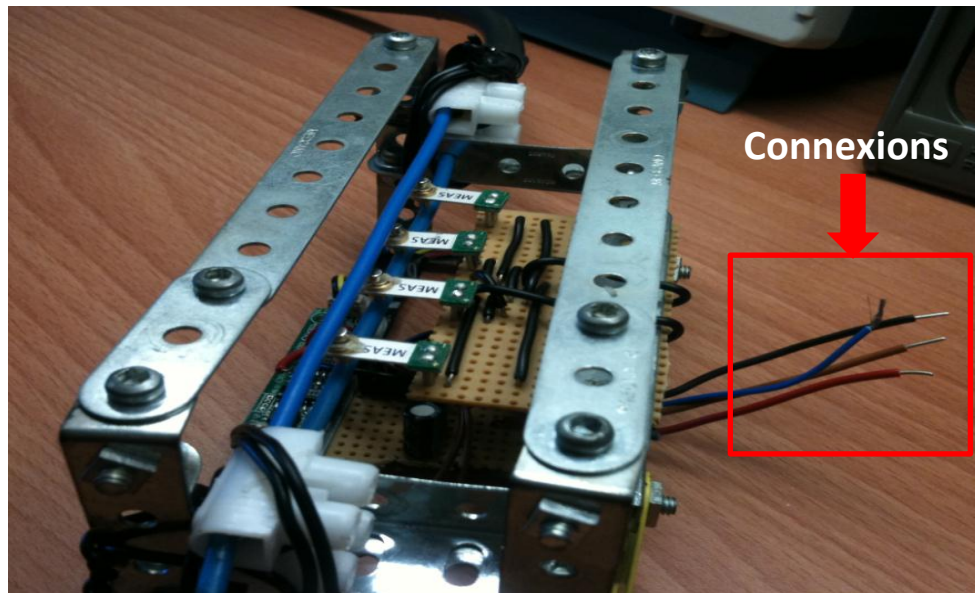


Figura. 94 Diferents angles del prototip d'Energy harvesting

A la figura 95 tenim els imants en moviment, per el camp magnètic produït per un corrent de 16,2 A (4000 W).

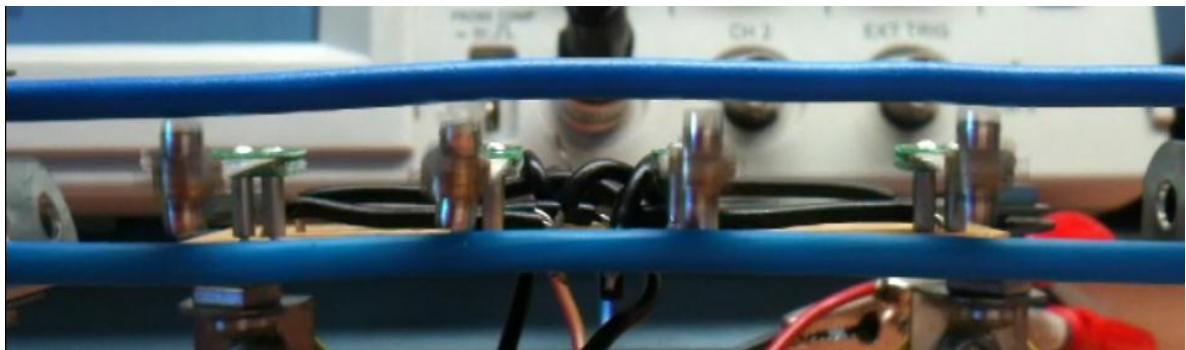


Figura. 95 Moviment dels piezoelèctrics

18.2 Prova real

Per realitzar una prova real amb tot el sistema complet s'ha fet servir un LED vermell. S'emularà el consum del node sensor amb aquest LED, els resultats no difereixen molt. Fem servir el LED perquè no disposem dels mòduls del node sensor.

Un altre cosa que s'ha de tindre en compte és que no cal que esperem a que el EH300 acumuli els 3,62 V, sinó que es pot agafar l'energia que necessitem directament del condensador, per així estalviar temps. Fer que actuï quan tingui la tensió o energia necessària per a que funcioni.

18.3 Temps de carrega/descàrrega

Les condicions amb les que s'ha realitzat aquest test són les següents:

- Potència que estem consumint amb els calefactors, "Consum 5"
- Consum simulat del LED cada 300 segons
- 200 μ F de capacitat

A la figura 96 es pot veure el cicle de que va seguint l'*energy harvester* per el consum de un LED. Cada descàrrega simbolitza un paquet de dades que enviem del node sensor.

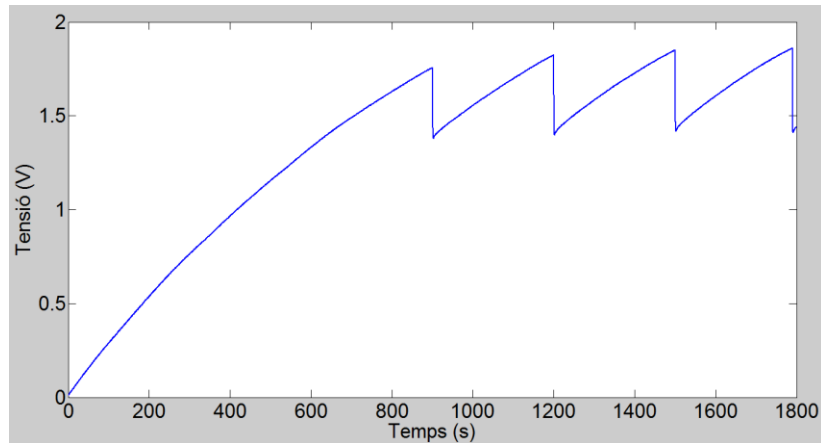


Figura. 96 Cicle de càrrega/descàrrega

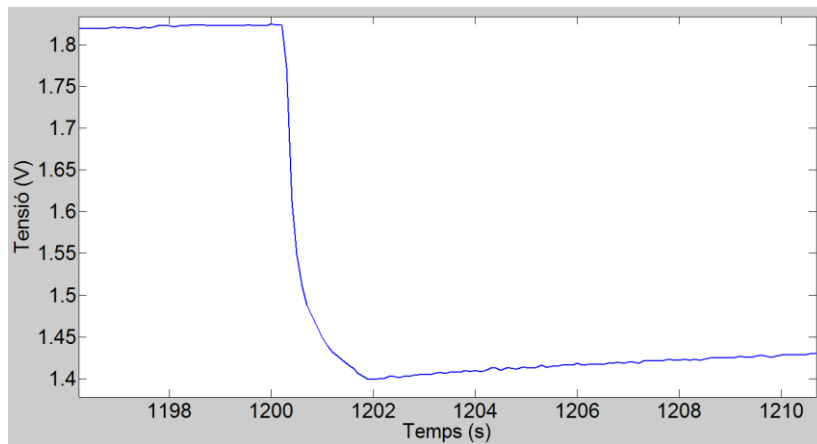


Figura. 97 Zoom de la descàrrega

L'energia emmagatzemada al segon 1200:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} 200\mu A \cdot 1.824^2 = 332,69\mu$$

Energia final del condensador:

$$E_{fin} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} 200\mu A \cdot 1,399^2 = 195,72\mu J$$

Per tant l'energia consumida durant el consum del LED és:

$$E_{consumida} = E_{inicial} - E_{final} = 332,69\mu J - 195,72\mu J = \mathbf{136,96\mu J}$$

Recordem que el consum que tenia el node sensor era de 152,56 μJ , un consum molt semblant al que estem simulant. Per tant podríem dir que en aquest cas si s'està consumint aproximadament 4000W podem enviar dades cada 300 segons. Una alternativa per millorar l'energia

emmagatzemada seria prendre mesures cada 200 o 300 segons i enviar aquestes mesures emmagatzemades cada 900 segons, per tal d'estalviar energia.

18.4 Temps de resposta

Definim temps de resposta, com el temps en que el condensador emmagatzema prou energia com per poder-la enviar a la càrrega i tornar-la a emmagatzemar. A la taula 13 es pot veure quins són els temps de càrrega per cadascuna de les potències que consumim. Les condicions d'aquesta taula són: condensador de 200 μ F i el circuit alimenta directament des de el condensador a un LED als 1,82 V que consumeix 136,96 μ J. El temps de recàrrega de la taula, és el temps que necessita el condensador per tornar a emmagatzemar els 1,82 V per tornar a enviar aquesta energia al LED.

Intensitat (A)	Potència Consumida(W)	Temps de càrrega(min)	Temps de recàrrega(min)
4.2	1000	70	30
8.2	2000	38	14
12.4	3000	25	9
16.4	4000	15	5

Taula. 13 Temps de resposta

A la figura 98 es pot veure les dades de la taula 13 de manera gràfica, la línia en blau és el temps de càrrega i la línia en vermell és el temps de recàrrega. Es pot veure perfectament com la tendència és, si augmentem la potència reduïm el temps d'enviament de senyal.

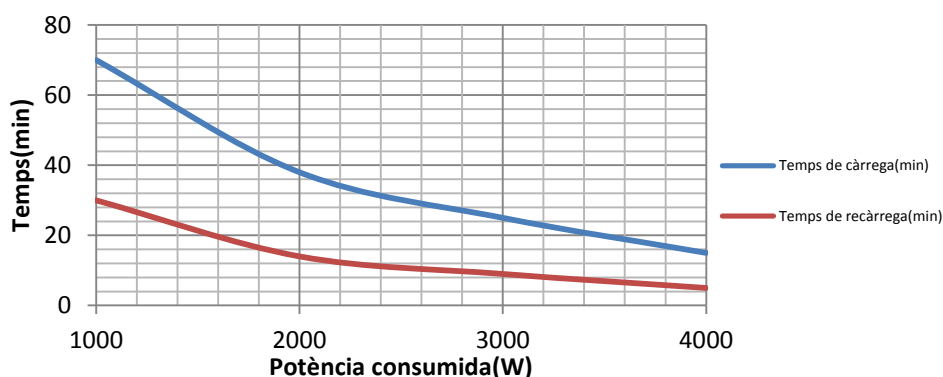


Figura. 98 Gràfica dels temps de resposta

18.5 Prova amb un transmissor real

Com ha s'ha mencionat anteriorment, no s'ha pogut comptar amb el node sensor. Però sí que s'ha pogut comptar amb un kit de transmissió, que consta de un transmissor i un receptor amb una pantalla LCD.

Els dispositius s'anomenen "KeeLoq 3 development kit" està dissenyat per programar microcontroladors (MCU), serveix per desenvolupar aplicacions segures d'autenticació per a una varietat de mercats com ara la seguretat sistemes (teclats, sensors remots i control d'accés), entrada remota sense clau (de l'automòbil) i autenticació (la identitat i la propietat) aplicacions.

A més, la tecnologia és compatible amb claus de 128 bits d'encryptació, més transmissions de dades, autenticació de la comunicació bidireccional, i també és compatible amb els algorismes de xifrat alternatius, com ara XTEA i AES. La millor solució basada en un microcontrolador codificador

permet la personalització, de manera que noves millores de seguretat es pot implementar a través del temps.

El kit permet enviar dades entre els dos elements, tan un com l'altre permet enviar i rebre dades. S'aprofitaran aquestes característiques per fer proves de consum del prototip i així veure una aplicació real i veure que el prototip funciona.

El que es farà durant aquesta prova enviarem una trama amb un missatge codificat, a la figura 99 es veu el transmissor i receptor, a la dreta i esquerra respectivament. Tot i que no és la situació ideal perquè aquest no està dissenyat per consumir poca energia, es faran unes proves per veure el seu comportament.



Figura. 99 Transmissor i receptor

A la primera prova, el condensador del EH300 de 200 μF estarà carregat a través dels elements piezoelèctrics moguts pel camp magnètic a 4000 W. Per tant tenim una tensió inicial de 2,7 V, tenim la sortida del condensador del EH300 connectat directament a l'alimentació del transmissor. Als 4 segons s'envia la trama i es veu que el transmissor consumeix 620,84 μJ aquest valor es pot extreure de la figura 100. Un valor molt més gran que el que consumia el node sensor (un valor de 152,56 μJ). Tot i que l'emissor ha consumit una energia, no ha sigut la suficient energia per enviar la trama.

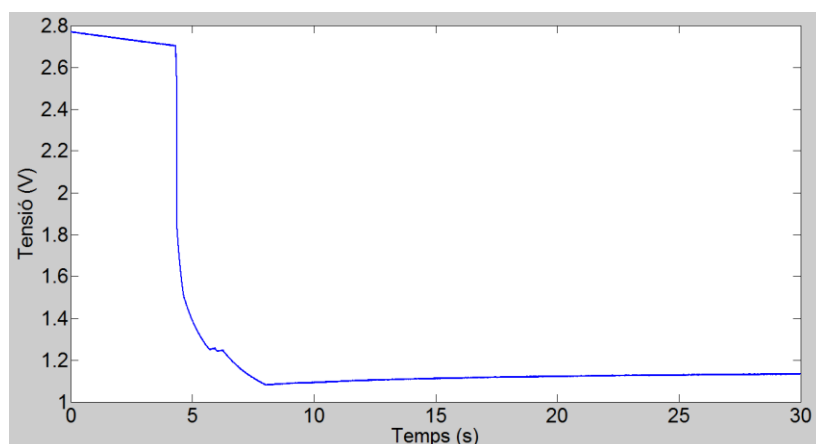
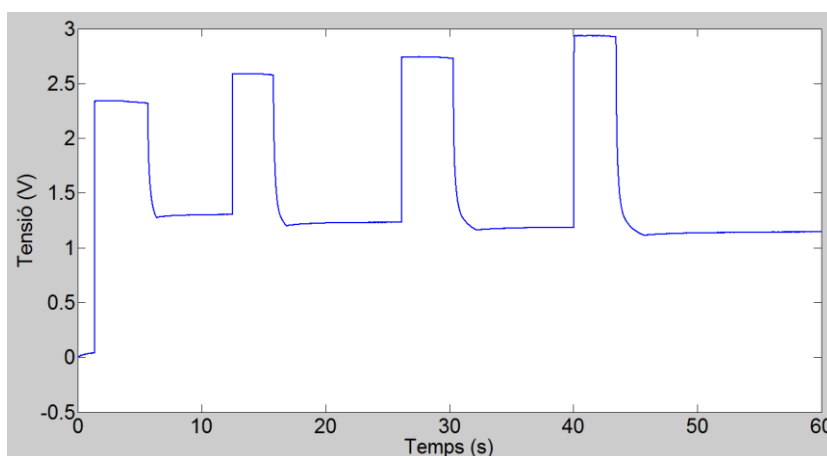


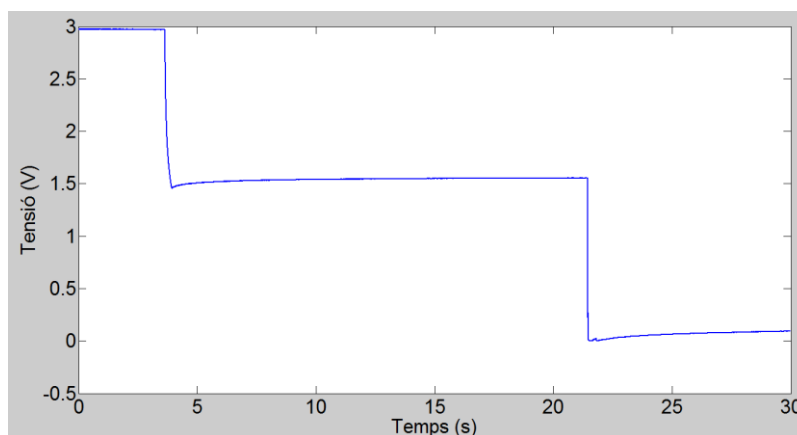
Figura. 100 Consum del transmissor amb una càrrega real

Com amb la càrrega emmagatzemada no ha sigut suficient, veurem quina és la tensió a la que el transmissor comença a transmetre. Es farà una prova en la que l'energia emmagatzemada s'anirà augmentant per saber en quina és l'energia que es necessita per enviar la trama. Per assegurar que s'envia la trama i veure l'energia que es consumeix es col·locarà el condensador inicial del EH300 de 1 mF.

Tot i que el transmissor no tingui l'energia suficient per enviar la trama, igualment consumeix energia. Gràcies a la prova de la figura 100, s'ha pogut conèixer la tensió a la que el transmissor envia la trama. Aquesta és de 2,928 V i presenta un consum de 3,65 mJ. El consum del node sensor és de 152,56 μ J un consum aproximadament 24 vegades major. Coneixent aquestes, aproximadament es trigarien uns 130 minuts per aconseguir aquesta energia, amb 4 Minisense a 4 g. Això s'ha extret de la gràfica que s'ha vist a la figura 78. El que es pretén dir amb aquestes dades és que es possible carregar el EH300 amb un condensador de 1 mF i fer funcionar un dispositiu que té un gran consum.

**Figura. 101 Prova d'augment de tensió per enviar una trama**

A la figura 102 per últim es veu que si s'arriba a emmagatzemar una energia de 4,5 mJ es poden arribar a enviar dos trames.

**Figura. 102 Enviament de dos trames**

S'ha programat el transmissor perquè envii un missatge com que s'ha rebut la trama correctament. A la figura 103 tenim com el missatge s'ha rebut al receptor, i ho mostra a la pantalla.



Figura. 103 Visualització del missatge

Es pot concloure que tot i que el prototip que s'ha dissenyat, ho ha estat per alimentar a un node sensor que consumeix molt poca energia. Es pot fer servir per altres aplicacions, com la que s'ha vist en aquest últim apartat. Es pot variar el condensador o posar més elements piezoelèctrics, per poder ajustar les necessitats de l'aplicació.

Capítol 19:

Alternatives

Com gairebé tot en aquesta vida, sempre hi ha alternatives. Potser per algun motiu o altre no es podrà tenir elements o situacions ideals al laboratori. En aquest apartat es pensaran alternatives on el *harvester* també funcioni en altres circumstàncies.

Una de les possibilitats és posar mes dispositius piezoelèctrics, per a part de aconseguir més potència, poder ajustar-los per treballar en diferents freqüències i obtenir un ample de banda d'actuació més ampli. El que s'ha dissenyat en aquest projecte, ofereix un petit rang de freqüències d'operació (d'entre 48 a 52 Hz).

Una alternativa possible seria: si es pogués ajustar la freqüència de ressonància del *harvester*, a la freqüència que vibra un cotxe en ralenti o en marxa, es podria emmagatzemar energia per alimentar petits circuits electrònics.

Un altre exemple i que encara produiria més energia seria el cas del tren. El tren genera unes grans vibracions degudes a la fricció amb les vies. Si col·loquéssim estratègicament dispositius com el nostre arreu del tren, podríem emmagatzemar energia. Aquesta, es podria emmagatzemar en bateries i fer-la servir per alimentar els panells de llums de les parades del tren, per exemple.

Encara que el *harvester* que hem fet té unes mides considerables. És un prototip, la seva mida es podria reduir més i es podria integrar dins de les regletes de connexió. Com les que tenim a casa nostre. Faria exactament la mateixa funció aprofitaria el camp magnètic del seu voltant.

Un altra alternativa possible seria la de col·locar un model més reduït de Harvester als electrodomèstics que generen vibracions, com per exemple un microones, una nevera o una rentadora.

Com a conclusió, es podria dir que aquest dispositiu que hem ideat es molt mal·leable. Es pot adaptar a molts tipus de situacions, on hi hagin energies mecàniques o magnètiques. Fins i tot es pot incloure una placa solar i fer un dispositiu amb tres tipus de font d'energia, mecàniques, camp magnètic, i lumíniques.

Capítol 20:

Conclusions del projecte

En aquest apartat exposaré les conclusions que he extret de cada bloc. De la introducció teòrica, no es pot extreure conclusions pràctiques però si teòriques. Pel que he après la freqüència de ressonància no només es troba en circuits RLC ressonants, sinó que cada estructura té la seva pròpia freqüència de ressonància mecànica. Aquest fet arriba a ser importantíssim, si no es té en compte pot arribar a tindre conseqüències desastroses.

Un exemple ben clar seria el del cas del pont de Tacoma Narrows, el qual no van tindre en compte la ressonància mecànica de tot el pont i es fa enfonsar al poc temps d'estrenar-lo per culpa d'un dia de vent constant de només 67 Km/h.

El segon bloc ha sigut molt important per al projecte. Abans de fer un prototip de diferents elements, s'han de conèixer com reaccionen exactament aquests elements a la realitat. També cal dir que mai és fàcil portar els càlculs que es fan en un full a dades de veritat. Això provoca una dificultat afegida, no tots els resultats teòrics donen el mateix a la realitat. Influeixen moltíssims factors físics, com per exemple, de condicions del material, de la temperatura ambient, etc.

El tercer bloc, m'ha obligat a desenvolupar la creativitat per fer una estructura que complís amb el meu objectiu. He hagut de passar allò que tenia a la ment a la realitat. En quant a resultats, la veritat es que podria haver tingut molt millors resultats, si hagués pogut disposar de més elements piezoelèctrics, però no ha pogut ser així.

Un altre fet que ha marcat l'objectiu principal del projecte, és que, en principi es treballava amb col·laboració d'un altre projecte, però el projectista no ha pogut finalitzar en la primera convocatòria el seu projecte. Fent així, que hagués de fer servir dades teòriques per realitzar els càlculs de la energia entregada.

Els resultats que s'han obtingut, són relatius. Depèn de l'aplicació per a la que es vulgui fer servir amb un temps de recàrrega de 10 minuts serà molt just o serà molt temps. Per posar un exemple si el que es vol es agafar una mesura de temperatura cada hora, doncs es podria fer perfectament. Per tant, el prototip funciona i emmagatzema energia per el camp magnètic generat per el flux de corrent d'un cable. El prototip ha complert amb el seu objectiu.

M'agradaria afegir que la piezoelectricitat és tot un món i tot que la gent no conegui què és, actualment està en període de desenvolupament. De cara al futur agafarà molta força, i serà un camp molt important de l'electrònica.

Capítol 21:

Conclusions personals

Un projecte final de carrera d'aquestes característiques, crec que et fa créixer. Dic això perquè durant el projecte un es dona compte, que no tot és perfecte i que les coses no sortiran ni a la primera ni a la segona. Realment t'hauràs d'aplicar de veritat per aconseguir resultats.

Crec que el resultats que he obtingut no han estat dolents, però si millorables. Sé que si hagués tingut la oportunitat d'aconseguir un altre tipus d'elements piezoelèctrics, hagués obtingut millors resultats. Però això també et fa aprendre que no es pot tindre tot el que es vol en el món de la enginyeria, que si no pots aconseguir certs materials te les hauràs d'enginyar amb altres per satisfer els teus objectius.

Una de les coses que crec que és més important a l'hora de fer el projecte, és que, un mateix es qui el porta endavant. Un mateix s'ha d'organitzar i saber com farà cada apartat del projecte, això és una bona experiència per al futur.

Crec que com a mínim el prototip que he fet no ha estat mal pensat. Cal aportar idees noves perquè es puguin millorar. Perquè així un dia o altre es puguin tenir dispositius electrònics a les nostres mans, els quals es carreguin amb molt poca tensió de la xarxa, o ni tan sols això, que les carreguem amb el nostre caminar. Fins i tot amb les ones electromagnètiques del Wi-Fi. per això aquests primers prototips poden marcar aquest futur, així que és important fer projectes com aquest.

En resum, sé que aquest és un projecte més de la titulació d'Enginyeria Tècnica de Telecomunicacions, i que potser els resultats no han sigut els millors. M'agradaria que els lectors d'aquest document apreciessin l'esforç que he posat per realitzar-lo i que l'he fet amb molt entusiasme i ganes. Si algun lector es veu motivat a seguir el prototip, que no ho dubti i el millori, perquè com deia Einstein *"En els moments de crisis, només la imaginació és més important que el coneixement."*

Bibliografia

Llibres

- [1] *"L'electromagnetisme per a l'enginyeria"*, Autors: Xavier Bohigas, Xavier Jaen, Cristina Periago, Edicions Universitat Politècnica de Catalunya
- [2] *"Introduction to Magnetism and Magnetic Materials"* Autor: David Jiles, Editorial Chapman & Hall.
- [3] *"Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales"* Autor: Limusa Wiley, Editorial Callister.
- [4] *"Scanning Force Microscopy with applications to Electric, Magnetic and Atomic forces"* Autor: Dror Sarid, Oxford University Express.
- [5] *"Piezoelectric Energy harvesting"* Autors: Alper Erturk i Daniel J.Inman, editorial Wiley.
- [6] *"Electromagnetic Vibration Energy harvesting Devices"* Autors: Dirk Spreemann i Yiannos Manoli, editorial Springer.
- [7] *"Mems AC Current Sensor for Residential and Commercial Electricity End-Use Monitoring Journal of Micromechanics and Microengineering"* Autor: Leland E, Wright P, editorial White R2009

Articles

- [8] *"Harvest Energy using a piezoelectric buzzer"* Autor: Carlos Cossio, article per a *"EDN"*, 20 de març del 2008.
- [9] *"Modeling and characterization of MEMS-based piezoelectric Harvesting devices"* Autors: TK Kamel, R Elfrink, M Renaud, D Holdfeld, M Goedbloed, C de Nooijer, M Jambuthan i R van Schaijk, articles per *"Journal of Micromechanics and Microengineering"*.
- [10] *"Micropower generation for autonomous nodes in smartgrid cables"* Autors: G Murillo, J Agustí, M López-Suarez i G Abadal, Universitat Autònoma de Barcelona.

Webs

- [11] www.energyharvestingjournal.com
- [12] es.farnell.com
- [13] www.piezo.com
- [14] www.aldinc.com
- [15] www.supermagnete.com
- [16] www.energyharvesting.net
- [17] www.meas-spec.com

[18] www.piceramic.com

Índex de figures

Figura. 1 Gràfica llei de Moore.....	13
Figura. 2 Increment de diferents sistemes electrònics	13
Figura. 3 Diagrama de blocs d'un Energy harvesting	16
Figura. 4 Estructura molecular de Perovskita	17
Figura. 5 Circuit equivalent d'un cristall piezoelèctric	17
Figura. 6 Gràfiques de comportament del circuit ressonant	18
Figura. 7 Procés de polarització	20
Figura. 8 Cicle d'histerèsis de la polarització	20
Figura. 9 Connexió Sèrie/Paral·lel	23
Figura. 10 Exemple de cantilever	24
Figura. 11 Esquema dinàmic cantilever PZT.....	25
Figura. 12 Circuit elèctric equivalent.....	26
Figura. 13 Geometria multi-morph	27
Figura. 14 Estructura esquemàtica de un sensor.....	30
Figura. 15 Camp magnètic d'un imant	32
Figura. 16 Sistema de vectors	33
Figura. 17 Camp magnètic en un fil conductor	35
Figura. 18 Vista transversal camp magnètic	36
Figura. 19 Acoblament magnètic	36
Figura. 20 Exemple gràfic llei Biot-Savart.....	36
Figura. 21 Exemple conductor infinit	37
Figura. 22 Shaker	40
Figura. 23 Configuració de l'acceleròmetre	41
Figura. 24 Muntatge Accelerometre	41
Figura. 25 Gràfica de comportament de l'altaveu	42
Figura. 26 Exemple de dades que ens dona l'acceleròmetre	42
Figura. 27 Representació gràfica de la linealització	43
Figura. 28 Gràfica de ressonància del datasheet del Minisense 100.....	45
Figura. 29 Gràfica del datasheet del V21B	47
Figura. 30 Gràfica del V21B obtinguda amb els càlculs.....	48
Figura. 31 Gràfica del datasheet del V25W	49
Figura. 32 Gràfica del V25W obtinguda amb els càlculs	49
Figura. 33 Model 1	51
Figura. 34 Model 1 sota moviment oscil·lant.....	51
Figura. 35 Model 2	52
Figura. 36 Model 2 sota moviment oscil·lant.....	52
Figura. 37 Seqüència de moviment del piezoelèctric	53
Figura. 38 Seqüència de moviment del Model 2.....	53
Figura. 39 Tensió i intensitat del Model 1.....	54
Figura. 40 Tensió i intensitat del Model 2.....	54

Figura. 41 Tensió i intensitat amb PZT-5H	55
Figura. 42 Muntatge per fer el test	56
Figura. 43 Gràfiques freqüències de ressonància amb diferents acceleracions	57
Figura. 44 Gràfiques escombrat impedàncies amb diferents acceleracions del Minisense	58
Figura. 45 Gràfica de Potència VS acceleració	59
Figura. 46 LDT1-028K Piezofilm.....	59
Figura. 47 Gràfiques freqüències de ressonància amb diferents acceleracions	60
Figura. 48 Gràfiques escombrat impedàncies amb diferents acceleracions del Piezofilm amb massa	60
Figura. 49 Gràfica de Potència VS acceleració	61
Figura. 50 Gràfiques freqüències de ressonància amb diferents acceleracions	61
Figura. 51 Gràfiques escombrat impedàncies amb diferents acceleracions del Piezofilm sense massa	62
Figura. 52 Gràfica de Potència VS acceleració	62
Figura. 53 Camp magnètic produït per un conductor	65
Figura. 54 Vista en tres dimensions del camp magnètic produït per un conductor.....	66
Figura. 55 Camp magnètic amb una menor intensitat elèctrica.....	66
Figura. 56 Vectors de camp magnètic	66
Figura. 57 Disposició de dipols ferromagnètics al voltant del conductor	67
Figura. 58 Seqüència d'apropament de dos conductors circulant la mateixa intensitat elèctrica	68
Figura. 59 Disposició de dipols ferromagnètics al voltant dels dos conductors	68
Figura. 60 Seqüència d'apropament de dos conductors amb Comsol.....	69
Figura. 61 Proves amb diferents seccions de conductor	70
Figura. 62 Circuit condicionador EH300.....	73
Figura. 63 Esquema dels pins del EH300.....	74
Figura. 64 Gràfiques de comportament del EH300.....	74
Figura. 65 Rectificador ona completa	75
Figura. 66 Gràfica de comportament fins a l'instant t2	76
Figura. 67 Primera senyal (+V), segona senyal (Vout).....	77
Figura. 68 Primera senyal (+V), segona senyal (Vr).....	77
Figura. 69 Primera senyal (+V), segona senyal (Vout).....	78
Figura. 70 Primera senyal (+V), segona senyal (Vr).....	78
Figura. 71 Primera senyal (+V), segona senyal (Vout).....	78
Figura. 72 Primera senyal (+V), segona senyal (Vr).....	79
Figura. 73 Gràfica de comportament a partir de l'instant t2	79
Figura. 74 Primera senyal (+V), segona senyal (Vout).....	80
Figura. 75 Primera senyal (+V), segona senyal (Vr).....	80
Figura. 76 Imant Neodimi.....	81
Figura. 77 Mides del Minisense 100.....	82
Figura. 78 Càrrega amb condensador de 1 mF amb una acceleració de 4 g.....	85
Figura. 79 Temps de càrrega amb condensador de 100 μ F i amb una acceleració de 2 g	86
Figura. 80 Temps de càrrega amb condensador de 200 μ F i amb una acceleració de 2 g	86
Figura. 81 Temps de càrrega amb condensador de 300 μ F i amb una acceleració de 3 g	87
Figura. 82 Temps de càrrega amb condensador de 200 μ F, una càrrega de 1,17 M Ω i una acceleració de 4 g.....	87

Figura. 83 Cicle de carrega/descarrega	88
Figura. 84 Temps de descàrrega	88
Figura. 85 Sortida Vout EH300	88
Figura. 86 Zoom de la sortida Vout EH300.....	89
Figura. 87 Consum de la resistència.....	90
Figura. 88 Esquema del node sensor	91
Figura. 89 Vista en planta alçada de l'estructura.....	93
Figura. 90 Vista de perfil de l'estructura	94
Figura. 91 Prototip en planta alçada	94
Figura. 92 Vista de perfil del prototip	95
Figura. 93 Vista general del prototip.....	95
Figura. 94 Diferents angles del prototip d'Energy harvesting.....	96
Figura. 95 Moviment dels piezoelèctrics.....	96
Figura. 96 Cicle de càrrega/descàrrega.....	97
Figura. 97 Zoom de la descàrrega	97
Figura. 98 Gràfica dels temps de resposta	98
Figura. 99 Transmissor i receptor.....	99
Figura. 100 Consum del transmissor amb una càrrega real.....	100
Figura. 101 Prova d'augment de tensió per enviar una trama	100
Figura. 102 Enviament de dos trames.....	100
Figura. 103 Visualització del missatge.....	101

Índex de taules

Taula. 1 Condicions test	41
Taula. 2 Equivalències de l'altaveu	42
Taula. 3 Característiques del Model 1.....	50
Taula. 4 Característiques Model 2.....	51
Taula. 5 Potència a 60Hz	57
Taula. 6 Potències extrems per acceleració.....	58
Taula. 7 Consums del calefactor Braun H-100	71
Taula. 8 Consums del calefactor Marux T-910/3	71
Taula. 9 Nomenclatura de les potències	72
Taula. 10 Característiques imant Neodimi.....	82
Taula. 11 Consum dels mòduls del node sensor	92
Taula. 12 Taula de consum total	92
Taula. 13 Temps de resposta.....	98